



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# NAPÁJECÍ SYSTÉM PALUBNÍ SÍŤ ELEKTROMOBILU

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2612 – Elektrotechnika a informatika

*Studijní obor:* 3906T001 – Mechatronika

*Autor práce:* **Bc. Lubomír Vích**

*Vedoucí práce:* Ing. Pavel Jandura





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# POWER SUPPLY SYSTEM FOR ONBOARD ELECTRONIC IN ELECTRIC VEHICLE

## Diploma thesis

*Study programme:* N2612 – Electrical Engineering and Informatics

*Study branch:* 3906T001 – Mechatronics

*Author:* **Bc. Lubomír Vích**

*Supervisor:* Ing. Pavel Jandura



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lubomír Vích**  
Osobní číslo: **M11000290**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Mechatronika**  
Název tématu: **Napájecí systém palubní sítě elektromobilu**  
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Seznamte se s výsledky všech řešených prací na téma elektrické palubní sítě elektromobilu a jejího napájení aktuálně řešených na TUL.
2. Navrhněte speciální snižující DC-DC měnič určený pro napájení palubní sítě elektromobilu z vysokonapěťové trakční baterie a zároveň schopný dobíjet 12V autobaterii vozidla.
3. Realizujte vlastní měnič s parametry respektujícími použití v automobilovém průmyslu.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace  
Rozsah pracovní zprávy: 40–50 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


- [1] PILVOUSEK, Lukáš. Elektromobil pro dvě osoby. Liberec, 2012.  
Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing.  
Robert Voženílek, Ph.D.
- [2] BELZA, Jaroslav. Spínané zdroje ve výpočetní technice [online]. [cit.  
2013-10-10]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/swmodeps/compow1.htm>
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Moderní spínací zdroje. 1. vyd. Praha: BEN,  
1999, 111 s. ISBN 80-860-5678-3.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Jandura  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2013  
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2014

  
prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.  
děkan

L.S.

  
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2013

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Pavlu Jandurovi, který mi umožnil tuto práci vytvořit. Konzultace s ním byly poučné a přinášely mnoho nápadů k realizaci práce.

Dále bych poděkoval svým blízkým, kteří mi pomáhali s vypracováním diplomové práce.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou a návrhem napájecího systému palubní sítě elektromobilu. Práce seznamuje čtenáře se zapojením elektrické palubní sítě auta a elektromobilem samotným. Nahlíží také na univerzitní elektrické automobily, které byly vyrobeny nebo jsou navrženy. Dále se zabývá problematikou měničů a následně spínaných zdrojů, na jejichž koncepci je postavena celá práce. Jsou zde popisovány druhy spínaných zdrojů a funkce jednotlivých částí zdroje. V druhé části obsahuje návrh snižujícího DC/DC měniče, který je určený pro napájení palubní sítě elektromobilu z vysokonapěťové trakční baterie. Vysvětluje a testuje celou jeho funkci. Závěr práce obsahuje samotnou výrobu měniče a jeho možnou instalaci na školní elektromobil.

*Klíčová slova: elektromobil, spínaný zdroj, napájecí systém palubní sítě, DC/DC měnič, palubní baterie.*

## Abstract

This thesis deals with the design of a power supply system in electric vehicle. It introduces the involvement of power supply system for onboard electronic in electric vehicle and electric vehicle itself. It studies university electric cars which have been already made or designed. It also deals with converter and switching power supply and the function of each part of the source. The second part contains the design of decreasing DC-DC converter which is intended to power up power supply system for onboard electronic of electric car from the high-voltage traction battery. It explains and tests all of its function. The conclusion contains a replacing of the converter and its installation for school electric car.

*Key words: electric vehicle, switching power supply, power supply system for onboard electronic, DC/DC converter, on-board battery*

## Obsah

<b>ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD K ELEKTROMOBILŮM.....</b>	<b>14</b>
1.1 ELEKTROMOBIL .....	14
1.2 AKUMULÁTORY .....	15
1.3 ELEKTROMOBILY TUL .....	16
1.4 ELEKTROMOBIL EŠUS .....	16
1.5 NABÍJEČKA PALUBNÍ BATERIE .....	17
1.5.1 <i>Elektromobil eTUL</i> .....	19
1.5.2 <i>Nabíječka pro eTUL</i> .....	19
<b>2 SPÍNANÉ ZDROJE .....</b>	<b>22</b>
2.1 ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ A FUNKCE OBECNÉHO SPÍNANÉHO ZDROJE.....	23
2.2 BUDOUCNOST SPÍNANÝCH ZDROJŮ .....	25
2.3 ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ SPÍNANÝCH ZDROJŮ .....	25
2.4 PROPUSTNÉ ZAPOJENÍ FORWARD .....	26
2.4.1 <i>Akumulující zapojení flyback</i> .....	27
2.4.2 <i>Dvojčinné zapojení PUSH-PULL</i> .....	28
2.4.3 <i>Můstkové zapojení polomost</i> .....	28
2.4.4 <i>Můstkové zapojení most</i> .....	29
2.4.5 <i>Shrnutí zapojení</i> .....	29
<b>3 DC/DC MĚNIČ S VÝSTUPEM 13,8 V A 60 A .....</b>	<b>31</b>
3.1 FUNKCE ZAPOJENÍ .....	31
3.2 OBVOD SG3224 .....	33
3.3 VÝKONOVÝ TRANZISTOR BUH1215 .....	34
3.4 NÁVRH TRANSFORMÁTORU .....	35
3.4.1 <i>Výpočet transformátoru</i> .....	36
3.4.2 <i>Program pro výpočet transformátoru</i> .....	39
3.5 VÝROBA A SCHÉMA NAVINUTÍ TRANSFORMÁTORU .....	41
3.6 NÁVRH TLUMIVKY .....	43
3.7 SOFT-START.....	44



<b>4</b>	<b>POROVNÁNÍ PARAMETRŮ VYROBENÉHO ZDROJE .....</b>	<b>45</b>
4.1	PŘÍPRAVA MĚŘENÍ NA PC ZDROJI .....	45
4.2	MĚŘENÍ PC ZDROJE .....	46
<b>5</b>	<b>VÝROBA DC/DC MĚNIČE .....</b>	<b>50</b>
5.1	REALIZACE ZDROJE .....	50
5.2	NÁVRH KRABICE.....	51
5.3	VÝPOČET CHLADIČE .....	52
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>54</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>55</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>55</b>
<b>A</b>	<b>NAVRŽENÝ DC/DC MĚNIČ .....</b>	<b>58</b>
A.1	SCHÉMA ZAPOJENÍ DC/DC MĚNIČE .....	58
A.2	POHLED NÁVRHU ZE STRANY PLOŠNÝCH SPOJŮ A OSAZENÍ SOUČÁSTEK.....	59
<b>B</b>	<b>SEZNAM SOUČÁSTEK .....</b>	<b>60</b>
<b>C</b>	<b>VYROBENÝ DC/DC MĚNIČ .....</b>	<b>62</b>
<b>D</b>	<b>TECHNICKÝ NÁKRES NAVRŽENÉ KRABICE .....</b>	<b>63</b>
<b>E</b>	<b>MĚŘENÍ ÚČINNOSTI .....</b>	<b>64</b>
<b>F</b>	<b>TABULKA SPOTŘEBY .....</b>	<b>65</b>

## **Seznam obrázků**

Obrázek 1: Ukázky elektromobilů .....	15
Obrázek 2: Elektromobil eŠus .....	17
Obrázek 3: Blokové schéma nabíječky .....	18
Obrázek 4: Elektromobil eTUL a jeho povinné vybavení .....	20
Obrázek 5: Můstkové zapojení polomost .....	28
Obrázek 6: Můstkové zapojení most .....	29
Obrázek 7: Obecné zapojení obvodu SG3524 .....	33
Obrázek 8: Program na výpočet transformátoru .....	40
Obrázek 9: Doporučené jádro a počty závitů .....	40
Obrázek 10: Časové charakteristiky napětí a proudu pro navržený spínaný zdroj .....	41
Obrázek 11: Budicí a proudový transformátor .....	42
Obrázek 12: Návrh krabice pro DC/DC měnič .....	52

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1: Ceny elektrické energie a benzínu .....	14
Tabulka 2: Tabulka spotřeby v automobilech .....	21
Tabulka 3: Porovnání spínaných a lineárních zdrojů .....	22
Tabulka 4: Shrnutí popsaných zapojení spínaného zdroje .....	30
Tabulka 5: Výkonové tranzistory BUK1215 .....	34
Tabulka 6: Měření vyrobených transformátorů .....	42
Tabulka 7: Měření zatěžovací charakteristiky PC zdroje .....	46
Tabulka 8: Účinnosti zdroje SeaSonic .....	48
Tabulka 9: Naměřené hodnoty vyrobeného DC/DC měniče .....	51

## Seznam grafů

Graf 1: Hustota energie jednotlivých elektrochemických článků.....	16
Graf 2: Graf měření výkonů na PC zdroji.....	47
Graf 3: Graf Výstupního napětí a proudu PC zdroje .....	47
Graf 4: Graf účinností zdroje SeaSonic .....	48
Graf 5: Porovnání účinnosti PC zdroje s vyrobeným DC/DC měničem .....	51

## Seznam zkratek a výrazů

AC	alternating voltage - střídavé napětí
BLDC	synchronní elektromotor s elektronickou komutací
ČSN	Česká státní norma
DC	direct voltage - stejnosměrné napětí
EAGLE	software pro výrobu plošných spojů
FLYBACK	propustný měnič
FORWARD	blokující měnič
L1	tlumivka
LFP	lithio-železo-fosfátový článek
LTC	linear Technology - měnič napětí
NEDC	new european driving cycle – nový evropský jízdní cyklus
MOSFET	metal oxide semiconductor field effect transistor
PC	personal computer - počítač
PFC	power factor correction – korekce účinníku
Q1	tranzistor
RE	relé
TL494	spínaný regulátor napětí
TR1	transformátor
TUL	Technická univerzita v Liberci
VAC	volty střídavého napětí
VDC	volty stejnosměrného napětí
U1	integrováný obvod SG3524

## Seznam použitých symbolů

Zkratka	Jednotka	Název
U	[V]	elektrické napětí
I	[A]	elektrický proud
P	[W]	činný výkon
S	[VA]	zdánlivý výkon
Q	[Var]	jalový výkon
R	[Ω]	elektrický odpor
$\cos \varphi$	[-]	účinník
$\eta$	[%]	účinnost
m	[kg]	hmotnost
L	[H]	indukčnost
C	[F]	kapacita
T	[s]	perioda
$T_M$	[°C]	teplota
t	[s]	čas
J	[A.mm <sup>-2</sup> ]	proudová hustota
f	[Hz]	frekvence
p	[-]	převod transformátoru
d	[cm]	průměr

# Úvod

Tato diplomová práce se zabývá elektromobilitou, která je v současnosti poměrně populárním tématem. Cílem této práce je zprovoznit zařízení, které bude dobíjet palubní baterii automobilu eTUL z vysokonapěťové trakční baterie. Účelem této práce je zprovoznit další komponentu na automobilu samotném tak, aby nic nebránilo v dalším rozvoji elektromobilu pro studijní a vývojové účely.

Začátek práce popisuje problematiku automobilů na elektrický pohon a seznamuje čtenáře s dosud vyrobeným elektromobilem eŠus a navrženým automobilem eTUL. Práce se zabývá oblastí napájecího systému palubní sítě elektromobilů, který popisuje. Následně popisuje koncepci obecných spínaných zdrojů, z nichž výrobek vychází. Zabývá se jak obecným spínaným zdrojem, který porovnává s lineárním, tak s jejich možnými zapojeními, jako je propustné zapojení *forward*, akumulární *flyback*, most nebo polomost.

Druhá část práce popisuje problematiku měničů, z nichž se věnuje nejvíce DC/DC měniči, který je pro tuto práci podle předchozích výsledků zásadní.

Praktická část práce popisuje zmiňovaný DC/DC měnič na koncepci spínaného zdroje, který je určen pro nabíjení palubní baterie z vysokonapěťových článků trakční baterie. Obsahuje návrh spínaného zdroje na napájecím napětí 13,8 V a proudu 40 A, kde je srdcem spínaný transformátor, který je následně popsán a vyroben. Celé zapojení je následně zrealizováno v programu *Eagle* a vyrobeno. V závěru práce je zapojení vyrobeno a testováno. Pro výrobek je navržena vhodná krabice. Výsledky měření jsou porovnány s měřením na sériově vyrobeném PC zdroji.

# 1 Úvod k elektromobilům

## 1.1 Elektromobil

Elektromobil je automobil na elektrický pohon. Zdrojem energie je elektrický akumulátor. Dojezdová vzdálenost elektromobilů se pohybuje běžně mezi 100–300 kilometry (BMW i3, NISSAN LEAF). Model Tesla S podle organizace NEDC až 500 km. Právě výdrž baterií a nutnost jejich častého dobíjení je momentálně jednou z hlavních překážek zavádění automobilů na elektřinu do běžného života.

Výhoda elektromobilů je, že při svém provozu neprodukují žádné výfukové plyny. Dále je třeba vyzdvihnout jejich téměř bezúdržbový provoz trakčního systému. Další výhodou baterií elektromobilů je jejich vysoká účinnost – energii dokážou převést na pohyb s 90 % účinností (v případě asynchronního motoru). Běžná účinnost spalovacích motorů se pohybuje kolem 30–40 %. Celková účinnost pohonu elektromobilu závisí pochopitelně i na účinnosti výroby elektřiny z primárního zdroje a energetické účinnosti použitých akumulátorů nebo palivových článků (dle použité technologie NiMH, Li-ion nebo Li-pol se pohybuje kolem 50 až 80 %) [17].

Pokud si osoba pořídí elektromobil, určitě je zajímavým faktorem finanční stránka, kterou naznačuje Tabulka 1.

Orientační srovnání ceny elektrické energie a benzínu		
	Elektromobil	Automobil
Spotřeba na 100km	15 kWh ( <i>el. energie</i> )	8 litrů ( <i>benzínu Natural 95</i> )
prům. cena za jednotku	4,54 Kč / kWh	35 Kč / l
cena na 100km	<b>68 Kč</b>	<b>280 Kč</b>

Tabulka 1: Ceny elektrické energie a benzínu [3]

Průlom elektromobilů lze zařadit do 90. let minulého století, kdy v USA představili modely GM EV-1, Ford Ranger EV nebo Toyota RAV4 EV. Ve světě také začal vývoj elektrobuseů. Ty můžeme potkat i na českých silnicích, kde jsou využívány jako MHD.



BMW i3

MOTOR: 125 kW

BATERIE: Li-Ion 22 kWh

MAX. RYCHLOST: 150 km/h

DOJEZD: 160 km



NISSAN LEAF

MOTOR: 80 kW

BATERIE: 24 kWh Lithium Manganese

MAX. RYCHLOST: 145 km/h

DOJEZD: 175 km

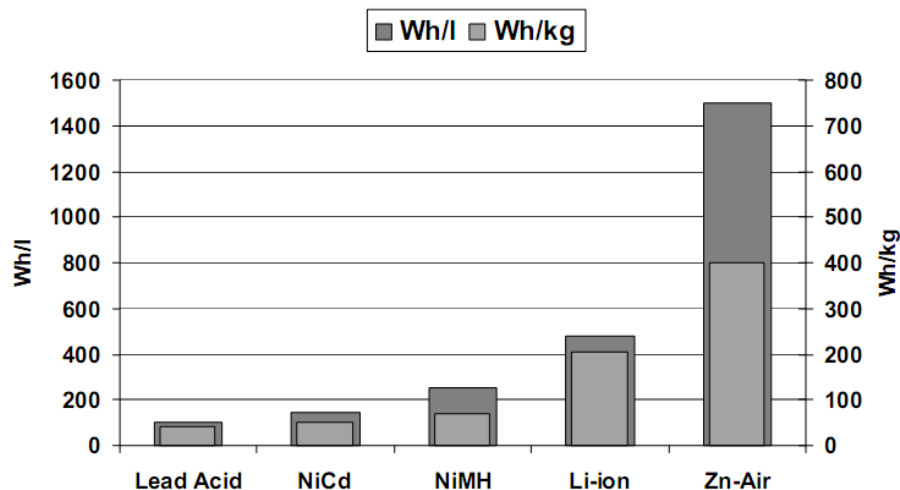
Obrázek 1: Ukázky elektromobilů [7], [2]

## 1.2 Akumulátory

Nejčastějším elektrickým zdrojem jsou pro elektromobily zatím elektrochemické akumulátory. Ty dokážou přeměnit a uchovat elektrickou energii v chemické podobě. Na trhu je jich dostupná celá řada. Pokud máme k dispozici dostatek finančních prostředků, není problém vybrat si kvalitní. Bohužel cena akumulátoru do automobilu překročí cenu vozu samotného.

Kapacita akumulátoru postupem času opadá. Nejčastější druhy akumulátorů jsou uvedeny v Grafu 1.





Graf 1: Hustota energie jednotlivých elektrochemických článků [16]

### 1.3 Elektromobily TUL

Technická univerzita v Liberci doposud pracuje na vývoji dvou elektromobilů. Je třeba navrhnout vhodné řešení napájení sítě elektromobilu. To je u běžných motorových vozidel řešeno alternátorem, který však elektromobily nemají. Nabízí se následující varianta řešení.

Vyrobí DC/DC měnič, který vytváří ze vstupního napětí výstupní 12 V stejně jako alternátor u motorových kolegů. Tato varianta obsahuje malou galvanicky oddělenou baterii navíc, která v případě poruchy měniče díky své kapacitě je schopna udržet po krátký čas automobil v pohybném stavu, díky čemuž získáme čas bezpečně odstavit vozidlo. Díky ní funguje i centrální zamykání. Varianta s DC/DC měničem je velmi populární a většina elektromobilů ji využívá. Stejně tak se předpokládá její využití i u navrženého elektromobilu eTUL.

### 1.4 Elektromobil eŠus

Prvním z univerzitních aut je elektromobil nazvaný eŠus. Na tomto automobilu se pracuje od roku 2011. Dosahuje rychlosti 80 km/h a na jedno dobití baterie dojede

až 100 km. Trakční baterie 10,8 kWh je složena ze sedmnácti LFP článků. Jejich váha je zhruba 150 kg a celková pohotovostní nosnost vozidla je přes půl tuny. Jedná se o dvoumístné vozidlo a celý elektromobil je složený z hliníkových profilů. Pohon tvoří BLDC elektromotor s šesti stupňovou převodovkou. Výkon motoru ve špičce dosahuje 40 kW, trvale kolem 15 kW. Tento elektromobil je specifický v tom, že maximální napětí trakční baterie dosahuje pouze 60 VDC napětí. Toto je dle normy ČSN 33 2000-4-41 [1] mezní hodnota bezpečného malého napětí, co se může na živých částech objevit.



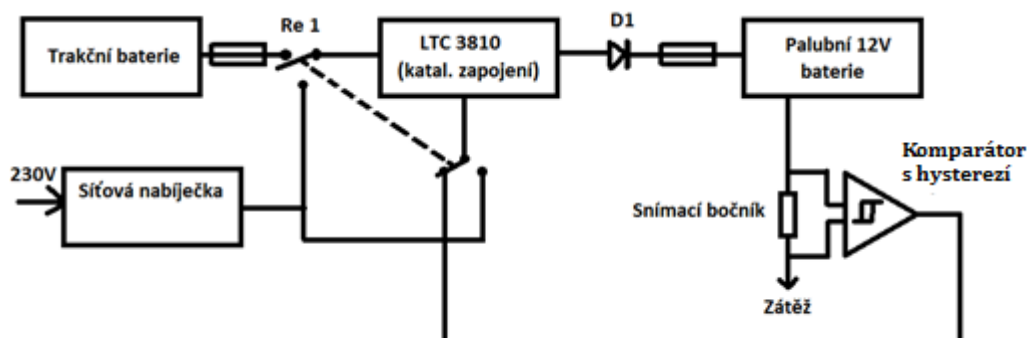
Obrázek 2: Elektromobil eŠus

### **1.5 Nabíječka palubní baterie**

Zjištění, jak funguje palubní síť elektromobilu a její nabíjení, je důležitým parametrem pro práci. Nabíječek pro autobaterie je mnoho a vždy je třeba navrhnout takovou, aby vyhovovala přesně daným požadavkům. Typickým příkladem je navržená nabíječka s měničem pro elektromobil eŠus.

Bylo třeba, aby vozidlo bylo vždy po vypotřebování palubní autobaterie dobíto. To předpokládalo vyvinout DC/DC měnič, který bude napájený z trakční baterie a ten

by se zapnul při požadavku na zvýšený odběr z palubní baterie. Pak přes měnič převezme zásobování trakční baterie. Základem obvodu je měnič s integrovaným obvodem LTC 3810.



Obrázek 3: Blokové schéma nabíječky

Zapojení ukazuje propojení baterií a síťové nabíječky společně s měničem LTC. To by bylo propojeno přepínacím bistabilním relé nebo skupinou více relátek. Zde by mohl nastat problém, že při možném výpadku sítě zůstane relé zaseknuté v jedné poloze. V návrhu je již použit měnič LTC3810.

Funkce celého zapojení je myšlena následovně. LTC3810, který je jádrem zapojení, slouží současně jako komponenta nabíječky. Relé RE1 je v provozním stavu v klidové poloze, zapojí-li se síťová nabíječka a její napětí se objeví na nabíjecím přívodu, relé se přitáhne. Využijeme toho, že LTC3810 má limitaci proudu, tím je nabíjecí proud omezen na 10 A (pokud by to bylo příliš, je možno experimentovat s pinem č.5 V<sub>rng</sub>, tím se nechá se změnou hodnot součástek posunout nástup limitace proudu).

Dioda D1 zajistí, aby na výstupních svorkách nebylo přítomno napětí (z nabíjené baterie) při vypnutém stavu. Výstupní napětí měniče poté bude muset být o její propustný úbytek zvýšeno tak, aby se akumulátor nabíjel, musí mít k dispozici cca 14,4 V (pro olověný akumulátor). Posun napětí je možno docílit pinem č. 9 V<sub>fb</sub> změnou děliče. Spínání měniče při nabíjení má na starosti operační zesilovač v diferenčním zapojení snímající úbytek napětí na bočníku, který je v sérii se zátěží (světla, atd.). Ten

by měl mít určitou hysterezi (diodu ve zpětnovazební smyčce), aby se zamezilo nechtěnému a častému spínání měniče při kolísání odběru zátěže. Proud sepnutí je třeba nastavit s citem. Hodnota proudu zbývajících do limitace měniče a odebíraným proudem, je nabíjecí proud palubní baterie. Měnič se inicializuje pinem č.13/*shutdown*. Tento pin obsluhuje v nabíjecím režimu nabíječka. Vstup a výstup měniče je chráněn pojistkami. V tomto řešení se nepočítá s nabíjením trakční baterie. Pokud by bylo třeba ji nabíjet, je možné opustit od nabíječky palubní baterie v koncepci lineárního zdroje a pokračovat cestou spínaného zdroje, jako je PC TL494.

### **1.5.1 Elektromobil eTUL**

Druhým školním elektromobilem je nevyrobený eTUL (Obrázek 15). V návrhu trakční baterie obsahuje 93 článků LFP s maximálním nabíjecím napětím 3,7 V. Vybíjet se budou na hodnotu 2,7 V.

$$U_{max} = 93 * 3,7 = 344,1 \text{ V} \quad (1)$$

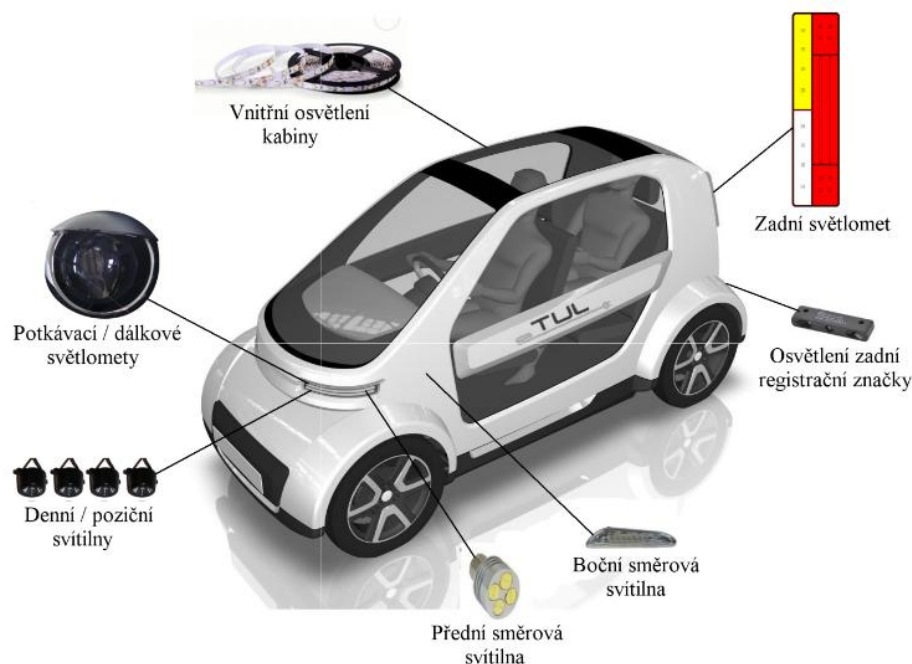
$$U_{min} = 93 * 2,7 = 251,1 \text{ V} \quad (2)$$

Jednoduchým výpočtem z rovnice (1) a (2) stanovíme minimální a maximální napětí na trakční baterii. Napětí bude dosahovat 344 V. Pro tento vůz v laminátové karoserii pro dvě osoby je spočítán plánovaný dojezd zhruba na 420 km [8].

### **1.5.2 Nabíječka pro eTUL**

Pro tento elektromobil je třeba vyrobit náhradu za alternátor s dobíječem palubní baterie. Rozdíl oproti eŠus je patrný. Mnohem víc článků a vyšší napětí žádá od řešení galvanické oddělení, které zajistí vyšší bezpečnost a ochrání při poruše alespoň část obvodu. To zajistí transformátor. Je třeba navrhnout řešení, ze kterého vznikne galvanicky oddělených 13,8 VDC, které jsou pro nabíjení 12 V baterie vhodné. Takové řešení se objevuje v počítačových zdrojích. Z výstupu baterie vychází napětí

dle vybití článků od 200 VDC až po 330 VDC. Počítačové zdroje dokážou pracovat i s nižším napětím kolem 70 V, jako níže testovaný PC zdroj Seasonic S12II-620 620W.



Obrázek 4: Elektromobil eTUL a jeho povinné vybavení [15]

Spotřebiče v automobilu mají obecně různou spotřebu. Jenom světla automobilu odebírají kolem 200 W. Klasické přední halogenové žárovky H4 odebírají 2x60 W přední, zadní 2x 20 W, parkovací přední i zadní každá 10 W. Součet je zmiňovaných 200 W.

$$P = 2 * 60 + 2 * 20 + 4 * 10 = 200 \text{ W} \quad (3)$$

Pro automobil eTUL byla vypracována tabulka spotřeby jednotlivých zařízení [9]. Rozšířená tabulka s detaily se nachází v příloze F. Z tabulky je patrné, že spotřeba automobilu při plném vybavení a výkonu je v řádu kW. Pro danou práci postačí výkon pouze kolem 550 W na světla a základní elektroniku. Klimatizace se svým příkonem nad 3000 W se aktuálně do školního eTUL zatím neuvažuje.

Zařízení			Příkon [W]
Osvětlení	přední	potkávací/dálková	50
		denní/poziční	10
		elektronika	50
		směrová	9
	zadní	brzdové	2,4
		zpětné	9
		mlhové	6
		obrysové	0,9
		směrové	0,9
		elektronika	30
		registrační značka	0,3
		vnitřní	kabina
Klimatizace <sup>1)</sup>			2000
Topení <sup>2)</sup>	sestava topících zařízení		800
	PTC <sup>3)</sup>		3000
	nezávislé		126
Posilovač řízení <sup>4)</sup>			x
Posilovač brzd <sup>4)</sup>			x
Stěrače			50
Ostřikovače			40
Elektrické ovládání oken			100
Zvukové výstražné zařízení			20
Soundgenerátor			20
Parkovací senzory			15
Audio			30
Elektrická vodní pumpa			50
Elektrická vakuová pumpa			80
Ostatní <sup>5)</sup>			250

Tabulka 2: Tabulka spotřeby v automobilech [15] vysvětlivky v příloze

Je třeba vyrobit zdroj s daným výkonem a vysokou účinností. Tu v současnosti nabízejí také spínané zdroje.

## 2 Spínané zdroje

Popularita spínaných zdrojů díky jejich výhodám roste. Na trhu jsou velice žádané. Tyto zdroje nabízejí vysokou účinnost a nízkou hmotnost. To jsou obvykle rozhodující faktory pro nákup či výrobu zdroje.

Návrh spínaného zdroje je komplikovanější, než tomu bývá u jednodušších lineárních zdrojů. Rozdíl je v množství součástek, kterých mívá spínaný zdroj víc.

Jak už bylo řečeno, výhodou těchto zdrojů je jejich vysoká účinnost. Spínané zdroje dnes nabízejí běžně účinnost kolem 85 %. S vysokou účinností přes 90 % to je oproti lineárním stabilizátorům s přibližně stejnými parametry velký rozdíl. U nich dosáhneme účinnosti v lepším případě 50 % a u méně kvalitních třeba jen 30 %. Parametry zdrojů každým rokem rostou a není vzácností koupit spínaný zdroj s účinností 90 %. Pro porovnání s lineárními zdroji však postačí Tabulka 3.

Parametr	spínaný zdroj	lineární zdroj
účinnost	75 [%]	30 [%]
objemová hustota výkonu	0,2 [W/cm <sup>3</sup> ]	0,05 [W/cm <sup>3</sup> ]
hmotnostní hustota výkonu	100 [W/kg]	20 [W/kg]
výstupní zvlnění	50 [mV]	5 [mV]
šumové napětí	200 [mV]	50 [mV]
odezva na skokové zatížení	1 [ms]	20 [us]
doba náběhu	20 [ms]	2 [ms]
Cena	přibližně konstantní roste lineárně	roste s výkonem exponenciálně

Tabulka 3: Porovnání spínaných a lineárních zdrojů. [5]

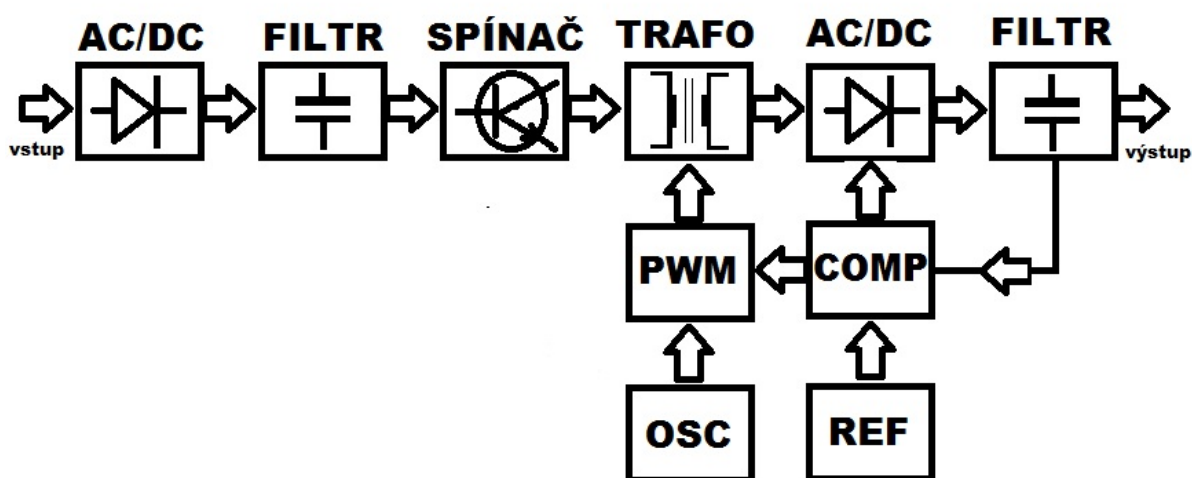
Díky vysokému pracovnímu kmitočtu, který zdroje nabízejí, se snáze filtrují zbytky střídavé složky. To platí při podstatně vyšších pracovních kmitočtech, než je kmitočet sítě 50 Hz. Pracovní kmitočty nad 20 kHz podstatně zvýší účinnost. V současnosti se frekvence spínaných pohybuje i v řádech MHz.

V neposlední řadě je třeba připomenout, že spínané zdroje se staly oblíbenými i díky jejich rozměrům, které v době minimalizace rádi uvítáme.

Všechny tyto vlastnosti a výhody, které tyto zdroje nabízejí, jsou vykoupeny vyšší pořizovací cenou. Vysoká pracovní frekvence součástek, (např. mezní kmitočty tranzistorů nebo diod), které zdroje dosahují, je podmíněna kvalitními součástkami tak, aby nám zdroj spolehlivě pracoval. Je na zákazníkovi, jak moc kvalitní zdroj žádá. Čím vyšší výkon, tím obvykle vyšší cena. Nevýhodou je vznikající rušení u výkonových tranzistorů. To se dá částečně odfiltrovat, ale zpravidla nedosáhne kvality lineárního zdroje.

## 2.1 Základní zapojení a funkce obecného spínaného zdroje

Spínaný zdroj se skládá z několika základních částí, jako jsou např. AC/DC převodník, transformátor, vstupní a výstupní filtry. Existují různá zapojení a ne vždy musí daný zdroj vše obsahovat.



Obrázek 5: Obecné zapojení spínaného zdroje [6].

Spínaný zdroj pracuje se stejnosměrným vstupním napětím. Pokud přivádíme do zdroje DC napětí přímo, nepotřebujeme usměrňovač. Toto vstupní napětí je třeba co nejvíce zbavit střídavé složky, což nám zajišťuje filtr. Při vstupu střídavého napětí s frekvencí 50 Hz, které snadno prochází filtrem, je třeba kvalitního vyhlazení. Střídavé



napětí se tedy musí důkladně vyhlazovat filtrem, na který jsou kladeny velmi vysoké nároky. To lze řešit vstupním filtrem navíc, který doladí zbytkové vlnění. Diody by měly splňovat malou kapacitu přechodu, nízkou spínací a vypínací dobu.

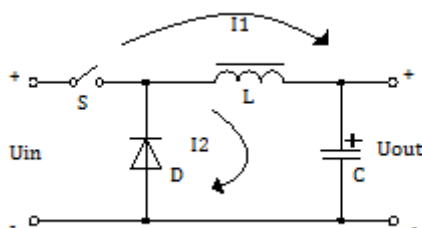
Před vstupem do transformátoru je třeba převést DC napětí na střídavý tvar. To zajišťují spínací tranzistory pracující na velmi vysoké frekvenci, které vytvoří obdélníkový střídavý průběh při kmitočtech v řádu desítek a stovek kHz dle kvality spínaného zdroje.

Vzniklá složka se transformuje a opět je třeba dané napětí usměrnit a vyfiltrovat zbytky střídavé a nežádoucí složky. Zde už nejsou kladeny tak vysoké nároky na usměrňovací diody. Vysoká frekvence zajistí kvalitnější filtrační účinky.

Spínané zdroje obsahují zpětnou vazbu, která porovnává velikost výstupních napětí nebo proudů a pomocí řídicí logiky ovládá také řídicí tranzistory.

Funkční zapojení spínaných zdrojů lze rozdělit na dvě skupiny. První skupinu nazveme obvody bez indukčností. Ta je založena na násobení napětí pomocí usměrňovačů. Aby bylo možné transformátor vůbec použít, řadí se před ně tranzistory, které pracují jako řízené astabilní obvody.

Druhou skupinu tvoří obvody, kdy se do série zapojí spínací prvek spolu s indukčností. Ta je běžně zapojena jako LC článek na Obrázku 6. Kondenzátor se dobíjí proudem. Napětí roste v závislosti nabití kondenzátoru. Čím je větší kapacita, tím pomaleji roste.



Obrázek 6: LC článek

Pokud tedy máme sepnutý spínač, energie se akumuluje. Po rozepnutí se indukčnost snaží udržet směr a velikost svého proudu. Energie se mění na dobíjecí proud pro kondenzátor. Aby mohl protékat proud, musí být zapojení doplněno o diodu, která

proudový obvod uzavře. Pokud je spínač sepnut, napětí na obvodu roste a pokud je rozepnut, děje se opačný jev.

## **2.2 Budoucnost spínaných zdrojů**

Zájem o spínané zdroje roste. Bipolární tranzistory pracují se spínací frekvencí do několika stovek kHz, tranzistory FET i do několika MHz. Díky zvyšování kvality pasivních prvků se očekává, že s rostoucí frekvencí se budou spínací zdroje zmenšovat a snadněji filtrovat. V mnohých zapojeních se objevují nové aplikace zapojení. Jednou z nich jsou synchronní usměrňovače. Ty nahrazují klasické usměrňovače nebo shottkyho diody. Synchronní usměrňovače pracují s propustným napětím 0,2-0,5 V. Jejich zapojení obsahuje tranzistor TMOS, který pracuje na  $U_{GE}$  s nižším napětím a s vyšší rychlostí. Další varianta, jež nahradila staré klasické zdroje, je rezonanční spínaný zdroj založený na principu sériové rezonance.

## **2.3 Základní zapojení spínaných zdrojů**

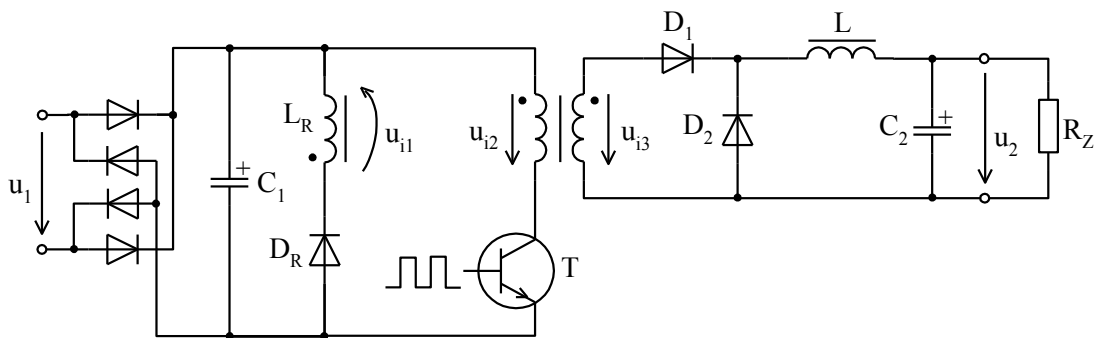
Pro pochopení správné funkce spínaných zdrojů je třeba pochopit i jejich vnitřní zapojení. Podle zapojení jednotlivých zdrojů a funkcí je dělíme do několika skupin.

- propustné zapojení *forward*
- akumulující zapojení *flyback*
- kombinované zapojení
- dvojčinné zapojení
- můstkové zapojení

Jejich nejčastější odlišností je přenos energie z primárních obvodů na sekundární.

## 2.4 Propustné zapojení forward

Propustné zapojení *forward* přenáší energii přímo přes transformátor. Jestliže tedy teče proud primárním vinutím, díky vzájemné polaritě teče i sekundárním. Je to určeno i polaritou diody na sekundární straně.



Obrázek 7: Propustné zapojení [18]

Začátky vinutí jsou označeny tečkou. Vinutí mohou být vinuta souhlasně, pak kladné polaritě na vstupu odpovídá záporná polarita na výstupu. Pokud se tečky nacházejí na opačných směrech, jsou vinutí vedena opačně a kladné vinutí na vstupu odpovídá kladnému na výstupu.

Pokud chceme zlepšit účinnost samotného zapojení, je možno přidat rekuperační diodu do série s kondenzátorem. Využívá zbylou energii tranzistoru z magnetického pole cívky. Funkce tohoto zapojení lze ukázat ve dvou časových intervalech:

$$U_{IN} = \frac{t_1}{L_1} = dI_c \quad (4)$$

Během druhé doby platí:

$$\frac{-U_{out} + t_2}{p * L_1} = dI_c \quad (5)$$

Porovnáním rovnic dostaneme:

$$U_{out} = \frac{U_{IN} * p * \delta}{1 - \delta} \quad (6)$$

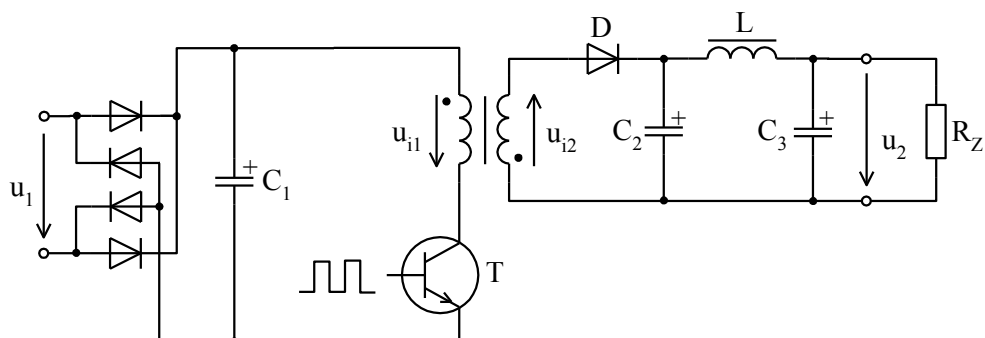
Převodní poměr transformátoru je dán vztahem:

$$p = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad (7)$$

Vztah pro  $U_{OUT}$  ukazuje, že výstupní napětí může být vyšší i nižší než napětí na vstupu v závislosti na transformátorovém poměru  $p$ .

#### 2.4.1 Akumulující zapojení flyback

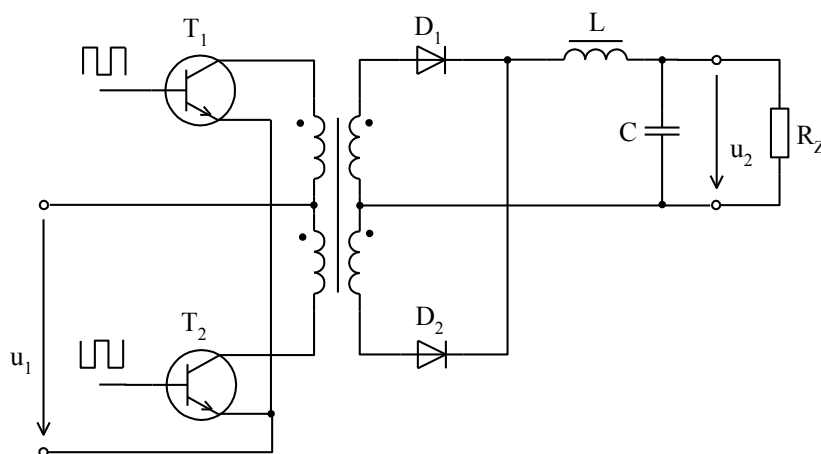
Akumulující zařízení *flyback* je charakteristické tím, že pokud na vstupním vinutí teče proud, tak na výstupu vzhledem k polaritě diody žádný neteče. Energie se akumuluje v magnetickém poli transformátoru, a jakmile celý proud nateče do primárního vinutí, až poté začne protékat do sekundární části. Při sepnutí tranzistoru nemůže téct proud jak v primárním, tak současně v sekundárním vinutí. Dioda je polarizována závěrně. Pokud tranzistor rozezne, proud na kolektoru naindukuje napětí v opačné polaritě. Dioda na primární části je propustná a vinutím protéká proud. Tím vzniká na sekundární části napětí. Zapojení obsahuje i diodu paralelně připojenou, která zabráňuje přebíjení kondenzátoru na výstupu.



Obrázek 8: Akumulační zapojení [18]

### 2.4.2 Dvojčinné zapojení PUSH-PULL

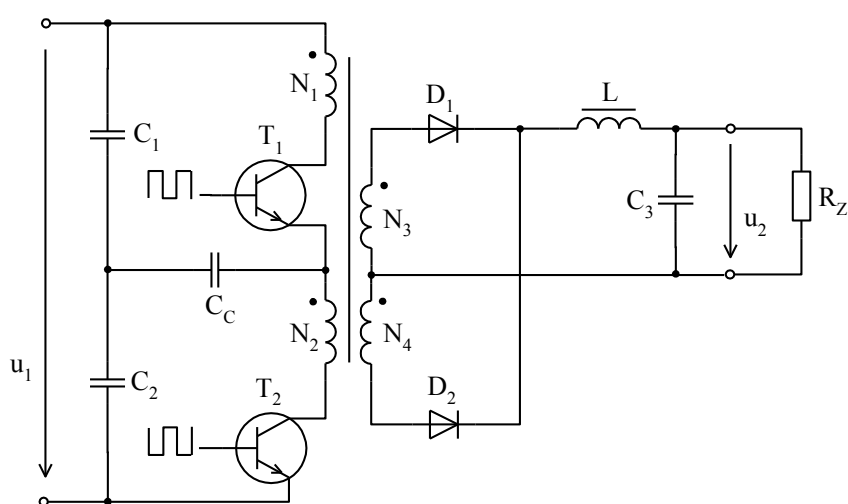
V anglický název PUSH-PULL hodně napovídá. Spínací prvky pracují v inverzním zapojení. Jejich proud teče do primárního vinutí transformátoru. Usměrňovač na výstupu bývá dvoucestný. Jedná se tedy o dvojčinnou verzi propustného zapojení.



Obrázek 9: Dvojčinné zapojení [18]

### 2.4.3 Můstkové zapojení polomost

Můstkové zapojení polomost se odlišuje tím, že některé součástky jsou zapojeny do můstků. Zapojení polomostu se vyznačuje tím, že jedna polovina mostu je tvořena

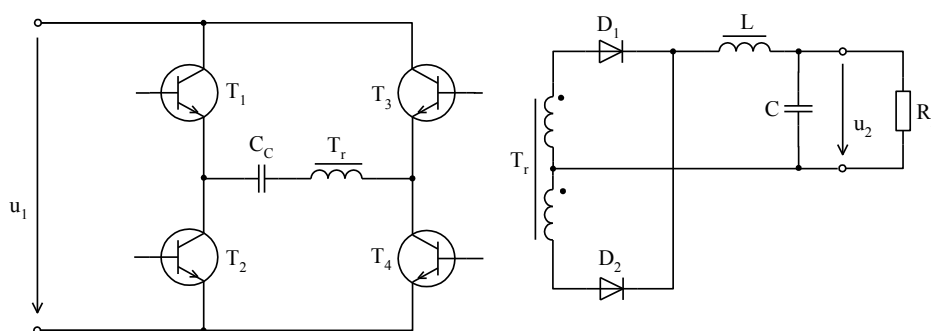


Obrázek 5: Můstkové zapojení polomost [18]

dvěma spínacími tranzistory a druhá dvěma kondenzátory. Každý tranzistor má vlastní vinutí k transformátoru. V tomto zapojení je část impulzního proudu, který musí pokrývat zdroj stejnosměrného napětí, kryta pomocí vybíjecích a nabíjecích proudů kondenzátorů. To se považuje za největší výhodu tohoto zapojení. Zapojení obsahuje kondenzátor mezi tranzistory s vysokou kapacitou. Tranzistory spínají v protifázi.

#### 2.4.4 Můstkové zapojení most

Můstkové zapojení most se vyznačuje tak, že obsahuje čtyři spínací tranzistory. Pokud proudy kondenzátoru z polomostu nestačí, je nutno přidat místo nich další dva tranzistory. To přináší komplikovanější buzení. Musejí být buzeny současně tranzistory T1 s T4 a v druhé půl periodě T2 s T3. Lze použít tranzistory typu MOS s indukovaným kanálem nebo JFET. U bipolárních se často používají v Darlingtonové dvojice tranzistorů. Všechny tranzistory je nutno dobře dimenzovat, protože jsou ohrožovány proudovými špičkami vznikajícími při vypínání zátěže.



Obrázek 6: Můstkové zapojení most [18]

#### 2.4.5 Shrnutí zapojení

V Tabulce 4 jsou stručně uvedeny hlavní výhody, nevýhody a použití výše uvedených zapojení spínaných zdrojů.

	Výhoda	Nevýhoda	Použití
Propustné zapojení	absence stejnosměrného sycení transformátoru	pomocné vinutí	od 100 W
Akumulující zapojení	účinnost 80%, nízká cena, jednoduchost	transformátor je stejnosměrně magnetizován	nízké výkony pod 100 W
Dvojčinné zapojení	dobrá účinnost (nad 80%), široká regulace zdroje	složitost, více tranzistorů	od 250W
Polomost	dobré regulační vlastnosti, krytí proudu díky můstku kapacitoru	dvě primární vinutí	od 500W
Most	dobré regulační vlastnosti, vyšší proudy v obvodu	komplikace při spínání tranzistorů	zdroje 1 kW a více

Tabulka 4: Shrnutí popsaných zapojení spínaného zdroje

### 3 DC/DC měnič s výstupem 13,8 V a 60 A

Navržené zapojení vychází ze znalostí obecných spínaných zdrojů a jeho podobnost se vyskytuje právě ve zdroji v běžném počítači. Literatura nabízí mnoho pohledů na různá amatérská i profesionální zapojení. Konkrétní schéma vychází právě z nich. Navržené schéma zapojení se nachází v příloze.

#### 3.1 Funkce zapojení

Celé zapojení začíná u kondenzátoru C1. Ten se po přivedení napájení začne nabíjet a daný nárůst C1 je udržován dvěma NTC rezistory. Ty při zahřátí ztrácí většinu vnitřního odporu.

Napětí na kondenzátoru udržují rezistory R3 a R4 v aktivních polohách vlivem dvou výkonových tranzistorů Q1 a Q2. Ty po krátký čas začínají vodit, ale kladná zpětná vazba z transformátoru TR3 vyvede systém z rovnováhy. Jeden z tranzistorů přijímá z TR3 zvýšený proud a druhému se naopak sníží hnací síla. V okamžiku mikrosekundy dojde k saturaci jednoho tranzistoru, a tím odpojí druhý. Řídicí obvod není ještě napájen, Q3 a Q4 jsou vypnuté, D11, D12 a D13 jsou dokonale izolované 26 vinutími na TR3, takže nemají zatím žádný význam.

Na primárním vinutí TR1 působí napětí kolem 150 V. Na sekundárním se objevuje  $\pm 20$  V. Shotkyho usměrňovače D5 až D8 usměrní napětí 20 V do induktoru L1. Tam začne téct zvýšený proud, který je usměrněn do primárního vstupu TR1. Primární proud projde přes vinutí TR3 a natlačí proud do báze tranzistoru. Tento zvýšený proud způsobí úbytek napětí na R1 a R5 a toto napětí se opět vrátí do transformátoru TR3. Po určité době dojde k saturaci feritového jádra TR3, což způsobí rychlý pokles napětí na tranzistoru Q1. Ten ztratí schopnost vést elektrický proud. Naopak Q2 začne elektrický proud vést. Proudění v jádru TR3 se sníží, překročí nulu a začne se zvyšovat v opačné polaritě, dokud nedojde opět k saturaci, která odpojí Q2 a opět zapne Q1. Mezitím začne růst proud v L1 a filtrační kondenzátory se nabíjí.



Pro bezpečné nastartování je potřebná úplná saturace TR3, než začne TR1 pracovat. Pokud by tomu tak nebylo, pak by tranzistory přepínaly pod vysokým proudem, který by je mohl zničit.

Celý zdroj bude kmitat jen několik cyklů, protože dioda D16 nabíjí C21 a C22 a napájí řídicí obvod. Jakmile je v obvodu dostatek napětí, převezme kontrolu nad oscilátorem U1 a pracuje následovně.

Na začátku je nulový čas a oba tranzistory jsou vypnuté. U1 ponechá oba výstupy ve stavech vysoké impedance. Q3 a Q4 jsou díky rezistorům R15 a R16 přivedeny k saturaci. Spolu s D12 a D13 způsobí zkrat na řídicím vinutí TR3. Tím je zachováno nulové napětí na transformátoru bez ohledu na to, jaký je proud na vinutích. C10 a C11, které jsou stále nabitě z předchozích cyklů, udržují Q1 a Q2 v záporném napětí.

Obvod U1 může zpětně zapnout tranzistor Q1 pomocí pinu 12. Tím vypne tranzistor Q4 a ukončí zkrat. Skrze R14 a D11 teče proud 15 mA do řídicího vinutí. Celkový obvod je uzemněn skrze Q3. Do báze Q3 poteče 50 mA. Ten se rychle zapne. Vznikne velký proud na kolektoru, který může dosahovat až 5 A při plném zatížení. Tento proud se přidá k celkovému proudu proudícímu v TR3 a pustí dostatek napětí do Q1, což udrží saturaci při vysokém proudu. Je to metoda, která přivádí silný proud přes TR3 do tranzistorů. Řídicí obvod proto nemusí poskytovat žádné další řídicí napětí.

Pokud tranzistor Q1 vede dostatečně dlouho, vypne obvod SG3524 pin 12. Následkem toho začne Q4 opět vést, TR3 se následkem toho opět zkratuje. Proud do 300 mA z TR3 se svede do Q4. Do TR3 přestane téct napětí a tranzistor se odpojí. Poté se uzemní pin 13 a začne řídicí okruh pro Q2.

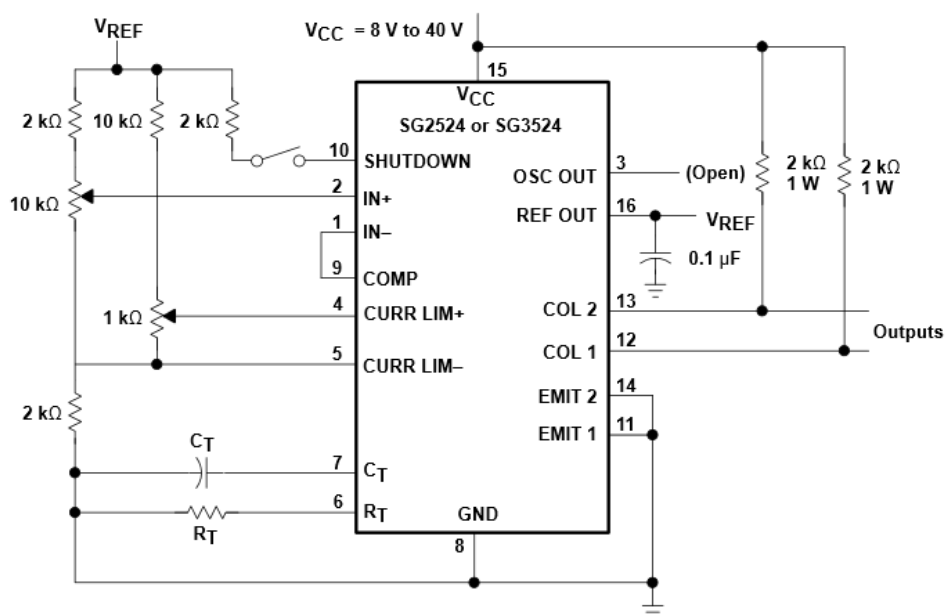
Obvod SG3524 využívá o rozhodování na výstupu dvou vstupů. Jeden z nich je výstupní napětí z rezistoru R26 a druhým je vzorek proudu z primárního vinutí na transformátoru TR2.

TR2 je proudový transformátor, který produkuje 200krát menší proud ze sekundárního vinutí oproti primárnímu. Tento proud (kolem 40 mA) je přiveden při plné zátěži do rezistoru R12, díky němuž vytváří maximální napětíové kolísání.

### 3.2 Obvod SG3224

Tento šestnáctipinový obvod je jedním ze základních kamenů tohoto zapojení. Pracuje na napětí od 8 do 40 V. Jeho funkce pro spínaný zdroj je následující.

Vnitřní napěťová reference použít napětí do pinu 16. Odpory R21 a R22 jsou rozděleny po 2,5 V a dané napětí využívají pro neinvertující vstup zesilovače. Invertující vstup získá vzorky z napětí na výstupu. S 13,8 V na výstupu a dobře nastaveným trimrem VR2 bude do pinu 1 téct 2,5 V.



Obrázek 7: Obecné zapojení obvodu SG3524 [14]

Druhý zesilovač, který má vstupy na pinech 4 a 5 je speciálně navržen pro limitování proudu. Jeho Offset je nastaven na 200 mA. To znamená, že pokud dojde mezi piny 4 a 5 k rozdílu 200 mA a většímu, stlačí se výstup error zesilovače.

Možnost přetočení o 180 stupňů signálu umožňuje vytvářet signály o různých délkách obdélníkových pulzů mezi dvěma výstupy tranzistorů. Emitory tranzistorů jsou uzemněny (piny 11 a 14), zatímco kolektory řídí Q3 a Q4.

Z tohoto obvodu je vyvedený konektor pro vnější vypnutí zdroje. Ten vychází z pinu 10 označovaný jako *shutdown*. Je vyveden spolu se vstupem a výstupem na vnější stranu krabičky.

### 3.3 Výkonový tranzistor BUH1215

Tranzistor je důležitý prvek obvodu. Pro transformátor spínaného zdroje pracuje jako výrobce střídavé složky, která transformátor uvede do funkce. Dané zapojení pracuje s dvěma tranzistory popsány Q1 a Q2. Tyto dva tranzistory nacházející se před transformátorem, jsou velmi náchylné ke zničení. Je třeba mít kvalitní součástku a obezřetně s ní pracovat.

Pro vybraný tranzistor je důležitý pracovní proud a napětí. Napětí se pohybuje v rozmezí 200–320 V a hodnota proudu dosahuje 8 A. Zapojení pracuje s bipolárními tranzistory. Tranzistory MOSFET pracují s vyšším kmitočtem, naopak bipolární tranzistory mají nižší ztráty ve vedení. Pro tento návrh je lepší, aby bylo rušení minimální než vysokorychlostní spínání, které nabízejí tranzistory MOSFET.

Vybrané jsou vysokorychlostní tranzistory BUH1215. Jejich parametry maximálních hodnot jsou uvedeny v Tabulce 5.

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{CBO}$	Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )	1500	V
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )	700	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )	10	V
$I_C$	Collector Current	16	A
$I_{CM}$	Collector Peak Current ( $t_p < 5$ ms)	22	A
$I_B$	Base Current	9	A
$I_{BM}$	Base Peak Current ( $t_p < 5$ ms)	12	A
$P_{tot}$	Total Dissipation at $T_e = 25$ °C	200	W
$T_{stg}$	Storage Temperature	-65 to 150	°C
$T_j$	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

Tabulka 5: Výkonové tranzistory BUH1215 [12]

Pro zapojení je možné použít i tranzistory s nižšími parametry. Důležité je hlídat hodnotu  $V_{ceo}$ , která udává maximální napětí mezi kolektorem a emitorem. V tomto případě ze vstupního napětí 200-320 V potřebujeme  $V_{ceo}$  minimálně 400 V. Možnou

náhradou za tyto tranzistory může být typ MJE13009 [13] s  $V_{ce0}$  400 V a s  $I_c$  12 A nebo o třídu nižší MJE13007 s  $V_{ce0}$  400 V a s  $I_c$  o hodnotě 8 A, které jsou běžně dostupné.

### **3.4 Návrh transformátoru**

Za srdce obvodu lze považovat hlavní transformátor. Tyto transformátory rozhodují o kvalitě spínaného zdroje. Transformátor se skládá z primárního a sekundárního vinutí. Obě vinutí mají určitý počet závitů, aby převedly z jedné části obvodu do druhé energii pomocí elektromagnetické indukce. Primární vinutí převádí elektrickou energii na magnetickou. Procházejícím proudem se vytvoří magnetický tok. Ten se přivede jádrem na sekundární stranu, kde se podle Faradayova zákona indukuje napětí. Transformátor pracuje pouze na střídavý nebo pulzní proud. Ve stejnosměrném napětí se magnetický tok nemění. Tím nevzniká na sekundárním vinutí žádné napětí. Transformátory se často používají pro galvanické oddělení obvodu.

Před výrobou je třeba znát přesné údaje o vybraném jádru. Je zde několik údajů, které před výrobou je nutné vědět. Jedním z nich je indukce. Transformátor obsahuje feritové jádro. Ferity mají nasycení 0,2–0,4 T. Pro kmitočty 25 kHz se pohybuje indukce do 0,15 T, pro vyšší kmitočty 100 kHz kolem 0,05 T. To záleží na velikosti jádra. Čím větší jádro, tím nižší hustota toku, jinak by došlo k přehřátí.

Transformátory fungují obvykle při buzení obdélníkového průběhu napětí. Oproti transformátorům pro síťový kmitočet 50 Hz, kde mohou počty závitů dosahovat tisíců, se pohybují počty závitů v jednotkách.

Na závěr je nutno dodat, že výpočet transformátoru zvláště pro vysoké frekvence je otázkou mnoha zkušeností. V literatuře se objevuje mnoho výpočtů a vzorců. Někdy se jejich závěry rozcházejí. Výpočet transformátoru je často založen na empirických vzorcích a realita bývá jiná. Ta se objeví až při samotném vyrobení transformátoru. Konečný výpočet vychází s několika literatur [4], [5], [6].

### 3.4.1 Výpočet transformátoru

Vstupní napětí jsou zadána z výstupních napětí trakční baterie. Napětí na primární straně transformátoru jsou rozdělena na půl. Vzorce pro výpočet s tím počítají. Hodnoty pro výpočet jsou následující:

$$U_{\min} = 200 \text{ V}$$

$$U_{\text{out}} = 13,8 \text{ V}$$

$$U_{\max} = 320 \text{ V}$$

$$I_{\text{out}} = 40 \text{ A nebo } 60 \text{ A}$$

$$\eta = 0.8$$

$$f = 25000 \text{ Hz}$$

Nyní je třeba spočítat poměr závitů. K tomu je třeba znát účinnost. Tu je možno předpokládat na hodnotu 0,8. Další neznámou ve vzorci je  $t_1/T$ , kterou určuje poměr periody a pulzu. Předpokládáme, že nemůže být díky spínání tranzistorů větší než  $\frac{1}{2}$ . I přesto počítáme s největší možnou alternativou. Napětí na diodě  $U_F$  je hodnota z katalogu 0,7 V. [10]

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{2} * \frac{U_{\min}}{U_{\text{out}} + 2 * U_F} * n = 5,26 \quad (8)$$

Díky známému poměru lze vypočítat cívku primárního poměru transformátoru. Neznámé lze dopočítat z následujících vztahů:

$$L = \frac{1}{2 * f} * (U_{\text{inmax}} - U_{\text{out}}) * \frac{U_{\text{out}} + 2 * U_F}{U_{\text{inmax}} + 2 * U_F} * \frac{1}{\Delta I_L} = 11,09 \mu\text{H} \quad (9)$$

kde

$$U_{\text{inmax}} = \frac{U_{\max}}{2 * \frac{N_1}{N_2} - 2 * U_F} = 35,1 \text{ V} \quad (10)$$

a maximální hodnota kolísání proudu sekundárním vinutím.

$$\Delta I_L = 0,4 * I_{out} = 16 \text{ A} \quad (11)$$

Po výpočtu potřebné indukčnosti je možnost správně dopočítat kolísání proudu a správný čas pulzu otevření tranzistoru  $t_1$

$$t_1 = \frac{1}{2 * f} * \frac{U_{out} + 2 * U_F}{U_{in_{min}} + 2 * U_F} = 13,04 \mu s \quad (12)$$

kde

$$U_{in_{min}} = \frac{U_{min}}{2 * \frac{N_1}{N_2} - 2 * U_F} = 21,91 \text{ V} \quad (13)$$

dále vypočtení maximálního špičkového proudu na primárním vinutí

$$\Delta I_L = \frac{1}{L} * (U_{in_{min}} - U_{out}) * t_1 = 9,53 \text{ A} \quad (14)$$

a na sekundárním vinutí

$$I_{max} = I_{out} + \frac{1}{2} * \Delta I_L = 44,77 \text{ A} \quad (15)$$

Z těchto výpočtů je patrné, že maximální proud na sekundární straně bude dosahovat hodnoty 44,77 A.

Dalším krokem je výpočet jádra pro daný transformátor. Pro výpočet vycházíme s přenášeného výkonu:

$$P = \frac{U_{out} * I_{out}}{\eta} = 690 \text{ W} \quad (16)$$

$S_{Fe}$  zvolíme z empirického vztahu:

$$S_{Fe} = 0,1 * \sqrt{P} = 2,62 \text{ cm}^2 \quad (17)$$

Pro tento průřez je třeba najít vhodné jádro. Vybrané je jádro Lj ETD5922-CF139. Ze vzorce pro výpočet indukce vypočítáme závity na primárním vinutí.

Z katalogového listu je hodnota  $A_{min}$  pro minimální průřez jádra  $360 \text{ mm}^2$  a indukce  $\Delta B$  zvolena hodnota  $0,2 \text{ T}$ .

$$\Delta B = \frac{U_{min} * \frac{T}{2}}{N_1 * A_{min}} \gg N_1 = \frac{U_{min} * \frac{T}{2}}{\Delta B * A_{min}} = 27,7 \cong 28 \text{ závitů} \quad (18)$$

Díky znalosti jedné strany závitů a poměru transformátoru je možno dopočítat závity na sekundární straně.

$$N_2 = \frac{N_1}{5.26} = 5,32 \cong 5 \text{ závitů} \quad (19)$$

Po výpočtu závitů je třeba určit průměr drátu, kterým se transformátor namotá. Nejdříve se vypočte obecná maximální hodnota primárního a sekundárního proudu.

$$I_{in_{max}} = \frac{P}{U_{min}/2} = 6,9 \text{ A} \quad (20)$$

$$I_{out_{max}} = \frac{P}{U_{out}} = 50 \text{ A} \quad (21)$$

Pro výpočet průměru drátu je třeba znát proudovou hustotu mědi značenou  $j$ . Ta se udává  $2\text{--}5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Zvolíme poloviční hodnotu tedy  $3,5 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ .

$$S_{Cu} = \frac{I}{j} \gg d_{out} = \sqrt{I_{out_{max}} * \frac{4}{3,5 * \pi}} = 4,26 \text{ mm} \quad (22)$$

$$d_{in} = \sqrt{I_{in_{max}} * \frac{4}{3,5 * \pi}} = 1,58 \text{ mm} \quad (23)$$

Pro navíjení primárního vinutí je z rovnice (22) drát s průměrem 1,6 mm a pro sekundární část z rovnice (23) s průměrem 4,3 mm. Hodnoty jsou zaokrouhleny na normované průřezy vyráběných měděných drátů.

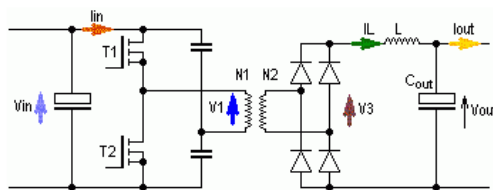
### 3.4.2 Program pro výpočet transformátoru

Existují softwary, které dokážou parametry pro transformátor spočítat. Bohužel pro transformátor spínaného zdroje je jich velmi málo. Jeden takový na svých stránkách zpracovali Dr. Heinz Schmidt-Walter a Holger Wenzel [11]. Tento software po zadání parametrů navrhne samotný transformátor a tlumivku, doporučí jádra a vypíše hlavní průběhy některých veličin. Je to velmi šikovný pomocník a kontrolor, díky kterému si můžeme zkontrolovat své výpočty.

Nejdříve se vybere typ měniče a poté vyplní parametry vstupních napětí a výstupního napětí a proudu. Nakonec daná pracovní frekvence tranzistoru. Pomocí matematických funkcí v programu získáme užitečné informace. Na hlavní stránce programu je vypsán poměr závitů, kolísající proud a indukčnost transformátoru. Po otevření detailů program navrhne vhodné jádro a počty závitů (viz Obrázek 14).



### Half-Bridge Push-Pull Converter



$V_{in\_min} / V$ 200	$V_{in\_max} / V$ 320	$V_{in} / V$ for the calculations 320	
$V_{out} / V$ 13.8	$I_{out} / A$ 40	$f / kHz$ 25	Calculate
$L / H$ 7.719E-6		$\Delta I_L / A$ for $V_{in\_max}$ 16	Coil Data
$N_1 / N_2$ 6.25		Transformer Data	

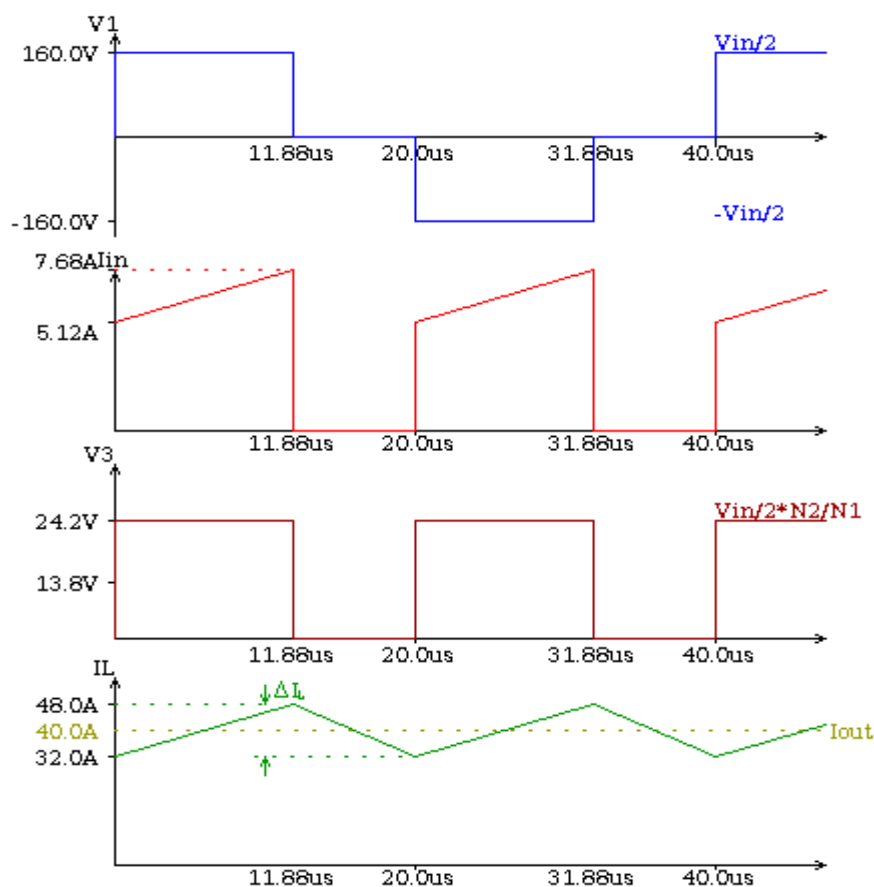
Obrázek 8: Program na výpočet transformátoru

No.	Core	Manufacturers	$A_{min} / mm^2$	$V_{in} / mm^3$	$\Delta B/T$	N1	N2
1	ETD29	Siemens	71	5350	0.2	142	23
2	ETD34	Siemens	92	7630	0.2	110	18
3	ETD39	Siemens	123	11500	0.2	82	13
4	ETD44	Siemens	172	17800	0.2	59	9
5	ETD49	Siemens	209	24100	0.2	49	8
6	ETD54	Siemens	280	35600	0.2	37	6
7	ETD59	Siemens	368	51200	0.2	29	4

Obrázek 9: Doporučené jádro a počty závitů

Pokud porovnáme výsledky vypočítané programem a vyhotovené ručně, uvidíme drobné odchylky. Počet závitů ručně počítaný na primární části vyšel 28 a programem 29. Je to pravděpodobně způsobeno zaokrouhlováním a tím, že program pracuje s ideální účinností nad 95 %, zatímco práce předpokládá s účinností pouze kolem 80 %. To samé platí u indukčnosti a i poměru závitů, který je v prvním případě 5,26 a programem vygenerovaný 6,25. I přesto vygenerované grafy lze považovat

za podobné, a proto lze předpokládat, že vyrobené trafo v DC/DC měniči bude takto opravdu reagovat.



Obrázek 10: Časové charakteristiky napětí a proudu pro navržený spínaný zdroj

Z grafu jsou patrné časy jednotlivých pulzů při maximálním napětí a primárním proudu. Na sekundární části též jeho maximální napětí a maximální kolísání proudu.

### 3.5 Výroba a schéma navinutí transformátoru

Pro výrobu bylo objednáno jádro Lj ETD5922-CF139 spolu s kostrou a svorkami. Nejprve byla upravena kostra, aby seděla do vyrobené destičky. Pomocí nehořlavé pásky a drátů byl transformátor navinut. Nejdříve primární část a poté přes nevodivou a nehořlavou pásku sekundární část. Při výrobě byly použity počty závitů získané z ručního výpočtu.



Obrázek 16: Výroba hlavního transformátoru

Další dva transformátory se skládají z jádra Lj E 2005S-CF138. Počty závitů pro proudový a budicí transformátor vycházejí z původního zapojení. Pro proudové trafo jeden závit na primární části a 100 na sekundární, pro budicí 8 na primární a 26 na sekundární.



Obrázek 11: Budicí a proudový transformátor

Pro všechny vyrobené transformátory byly proměřeny indukčnosti měřicím přístrojem LCR tester HIOKI 3522-50. Výsledky jsou následující:

Transformátor	Primární část	Sekundární část
Hlavní TR1	1,52 mH	91 $\mu$ H
Proudové TR2	1 $\mu$ H	95 $\mu$ H
Budicí TR3	3,3 $\mu$ H	71 $\mu$ H

Tabulka 6: Měření vyrobených transformátorů

### 3.6 Návrh tlumivky

Tlumivku lze namotat na toroidní kroužek nebo použít stejně jako v případě transformátoru feritové „E“ jádro. Bylo pořízeno feritové jádro Lj ETD4415-CF139.

Výpočet vychází z obecného vzorce energie:

$$W = \frac{I}{2} * L * I_{max}^2 \quad (24)$$

Pro další výpočet je třeba vypsát potřebné veličiny z katalogu pro dané jádro. Magnetická vodivost  $A_L=262 \text{ nH}$ , průřez magnetického jádra  $A_E=173 \text{ mm}^2$ , účinná délka jádra  $l_e=103 \text{ mm}$  a maximální hustota magnetického toku v jádře  $B=0,2 \text{ T}$  a efektivní permeabilita  $\mu_e = 74 \text{ Hm}^{-1}$ . Po rozepsání základního vzorce lze spočítat celkovou energii v cívce:

$$W = \frac{I}{2} * \frac{B^2}{\mu_0} * A_e * \frac{l_e}{\mu_e} = 9,03 \text{ J} \quad (25)$$

kde konstanta permeabilita vakua  $\mu_0 = 1,2*10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$ .

Celkový počet závitů určíme z vypočítané indukčnosti a magnetické vodivosti jádra:

$$N_l = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = 3,92 \text{ z} \quad (26)$$

Stejně jako u transformátoru vypočteme tloušťku drátu pro navinutí:

$$S_{Cu} = \frac{I_{out_{max}}}{j} \gg d_L = \sqrt{I_{out_{max}} * \frac{4}{3,5 * \pi}} = 4,26 \text{ mm}^2 \quad (27)$$

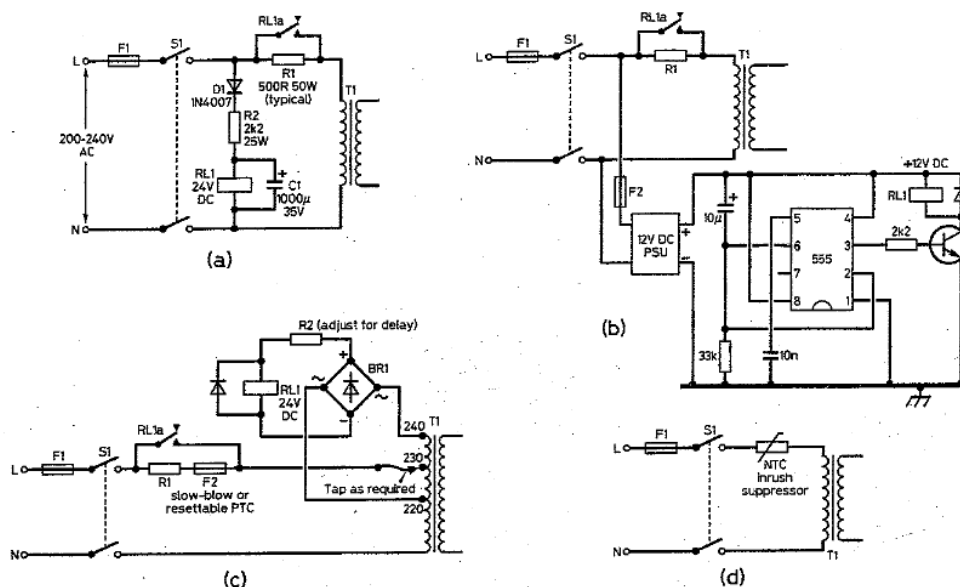
Pro realizaci se počítá s použitím vyrobených tlumivek vydaných z PC zdrojů.

### 3.7 Soft-start

Mnoho spotřebičů potřebuje při zapnutí snížit proudový ráz, aby nenastalo poškození další části obvodu, v lepším případě shození jističe. Při zapínání velkých transformátorů může počáteční magnetizační proud dosáhnout až desetinásobku jmenovitého proudu, i když transformátor není zatížen. Účelem softstartu je tento počáteční proud omezit na snesitelnou úroveň. Jednoduchým omezovačem takového rázu je termistor. Ten má při zapnutí velký odpor, a tím omezí proudový náraz. Postupným ohříváním zmenšuje svůj odpor zpravidla pod  $1\ \Omega$ . Celkový úbytek naznačuje rovnice (28), hodnoty proudu a odporu závisí na aktuálním stavu. Maximální  $P$  termistoru dle katalogu je 5,1 W. Z toho vychází, že nevýhodou NTC je snížení celkové účinnosti. Další nevýhodou je, že opětovném spuštění zdroje zůstává termistor zahřátý a proudový ráz může z větší části projít.

$$P = R * I^2 \text{ [W]} \quad (28)$$

Tento termistor zvaný někdy NTC rezistor, není jediným řešením, jak se vyrovnat s proudovým rázem. Vhodným dalším řešením je softstart, složený z časovače a relé [9].



Obrázek 19: Varianty zapojení softstartu

Pro tuto práci bylo zvolené díky jednoduchosti řešení s NTC rezistory. Nicméně bylo počítáno s variantou upustit od rezistoru a řešit tento softstart přes relé.

## 4 Porovnání parametrů vyrobeného zdroje

Důležitým faktorem v této práci je porovnat naměřené parametry vyrobeného spínaného zdroje se sériově vyráběným zdrojem. Měření nám napoví, zda se práce v tomto směru vyplatila.

Jako objekt na porovnání byl vybrán průměrný zdroj do počítače o podobném výkonu 620 W SeaSonic. Tento zdroj vyrábí firma SeaSonic a garantuje u něj velmi vysokou účinnost tzv. gold 80+. Jeho cena se na trhu pohybuje kolem 1500,- korun.

### 4.1 Příprava měření na PC zdroji

Porovnání se měřilo ve dvou bodech. Prvním bodem měření byla zatěžovací charakteristika. Ta ukáže, jakých hodnot proudu a napětí zdroj dosahuje při různých zatíženích. Druhým bodem je měření účinnosti jak na vstupu zdroje, tak za usměrňovačem, který se v návrhu této práce nemusí z důvodu stejnosměrného napětí na vstupu objevovat. Cílem bylo zjistit, kolik procent účinnosti díky vynechání usměrňovače ušetříme.

K měření zdroje byl použit jako napájecí zdroj AC power source/analyzer Agilent 6813B, multimetr VoltCraft MT-51 pro měření výstupního napětí a klešťový multimetr TRMS 400 pro měření proudu na výstupu.

Samotný napájecí zdroj Agilent je velmi „inteligentní“ zdroj, který dokáže po správném nastavení změřit potřebné veličiny, jež jsou důležité pro dané měření, v tomto případě činný, zdánlivý a jalový výkon, vstupní proud a PFC. PFC (anglicky *power factor correction*) je proces, který posouvá vstupní fázi vzhledem k napětí. Upravuje účinník  $\cos \varphi$ , který běžně dosahuje hodnoty 0,7, téměř k jedničce.

Jako spotřebič sloužily u měření 12 V halogenové žárovky s reflektorem s výkonem a pro toto měření odběrem 50 W. Různé kombinace zapojené na výstupních vývodech zdroje na 12 V větvi určovaly konečný odebíraný výkon. Podle termokamery dosahovala teplota žárovek ke 100°C a hrozilo popálení.

## 4.2 Měření PC zdroje

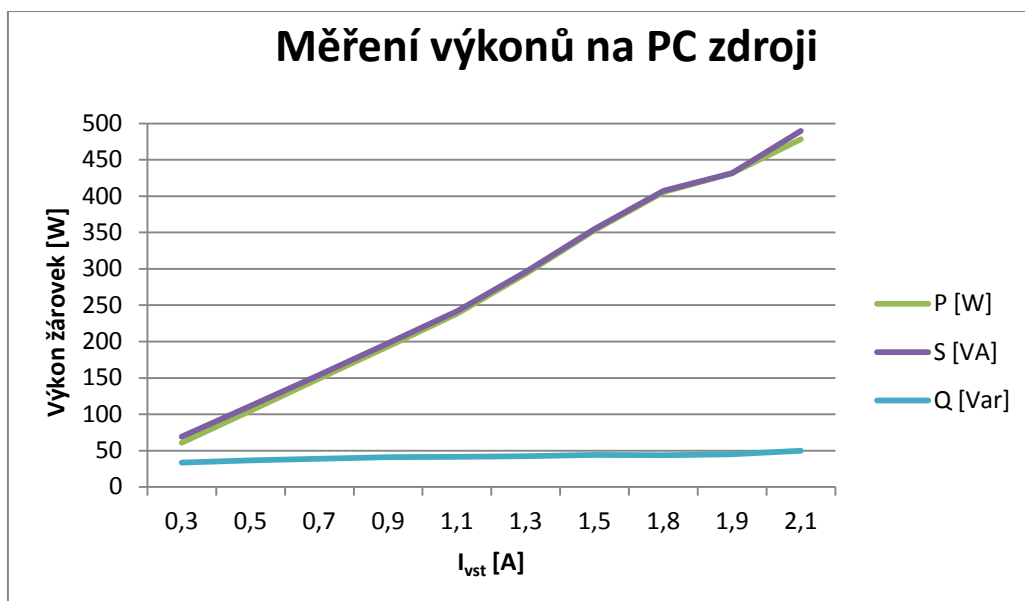
Jako první se měřila zatěžovací charakteristika zdroje SeaSonic. Na výstupní svorky Agilent zdroje se nastavilo napájecí napětí 230 VAC a připojil se PC zdroj. Agilent držel velmi přesně vstupní napětí 230 VAC a z této strany nebylo třeba se obávat nějakých nepřesností v měření.

První se připojila jedna žárovka o hodnotě 50 W a změřil se výstupní proud a napětí. K tomu Agilent doměřil výše zmiňované další veličiny. Poté se přidávaly další žárovky, a to do hodnoty 500 W. Všechny veličiny byly odečteny a zapsány do tabulky. Zdroj při vyšších hodnotách zátěže nestíhal a po překročení výkonů 400 W se kvůli vysokým proudům nad 20 A vypínal. Nárazově se po ochlazení daly změřit i poslední hodnoty výkonů, než se zdroj vypnul. To bylo zřejmě způsobeno tím, že byla zatížena pouze jedna větev PC zdroje.

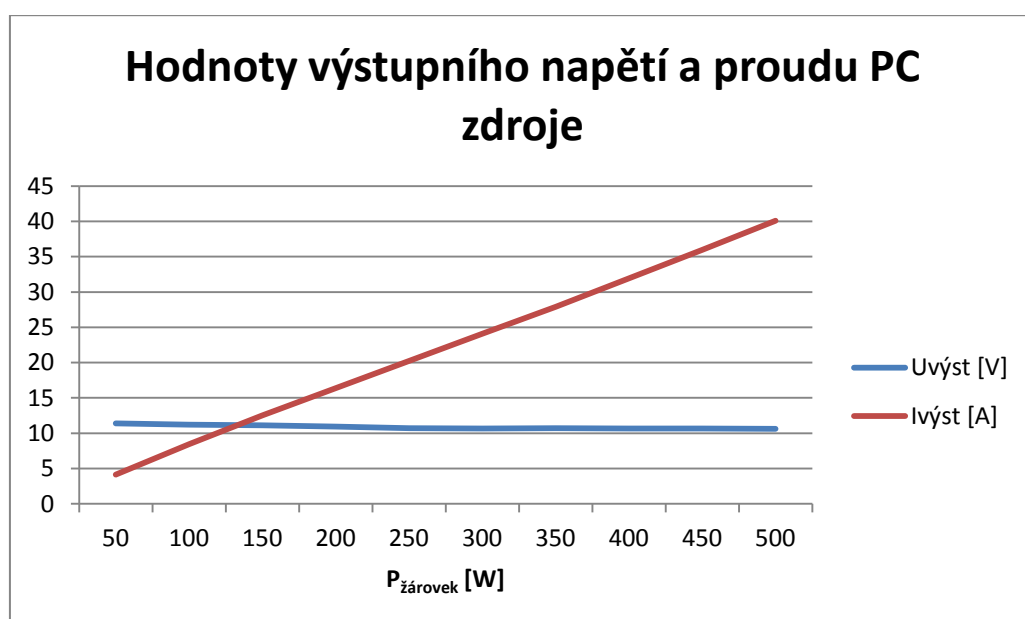
Tímto byla změřena zatěžovací charakteristika PC zdroje SeaSonic, ke které bylo paralelně měřeno multimetrem VoltCraft MT-51 výstupní napětí a klešťovým multimetrem TRMS 400 výstupní proud. Výsledky jsou následující:

Výkon 50 W žárovek	$U_{vst}$ [V]	$I_{vst}$ [A]	P [W]	S [VA]	Q [Var]	PF [-]	$U_{výst}$ [V]	$I_{výst}$ [A]
50	229,95	0,302	60,8	69,4	33,8	0,874	11,39	4,13
100	229,95	0,486	104,9	111,3	36,7	0,944	11,21	8,45
150	229,95	0,67	149,5	154,3	38,9	0,968	11,11	12,53
200	229,95	0,861	193,4	197,7	41,2	0,978	10,95	16,39
250	229,95	1,052	238,4	241,7	41,7	0,985	10,7	20,21
300	229,95	1,289	293,2	295,9	42,5	0,989	10,68	24,07
350	229,95	1,528	353,3	355,1	44,1	0,992	10,7	27,9
400	229,95	1,786	405,8	407,6	43,9	0,994	10,68	31,95
450	229,95	1,861	431,6	431,7	45,2	0,994	10,66	35,96
500	229,95	2,099	478,1	489,9	49,7	0,995	10,61	40,1

Tabulka 7: Měření zatěžovací charakteristiky PC zdroje



Graf 2: Graf měření výkonů na PC zdroji



Graf 3: Graf Výstupního napětí a proudu PC zdroje

Druhou částí bylo měření účinnosti. Tu vyjadřuje poměr vstupního a výstupního výkonu v rovnici (28).

$$\eta = \frac{P_{výst}}{P_{vst}} * 100 \text{ [% , W , W , \%]} \quad (29)$$

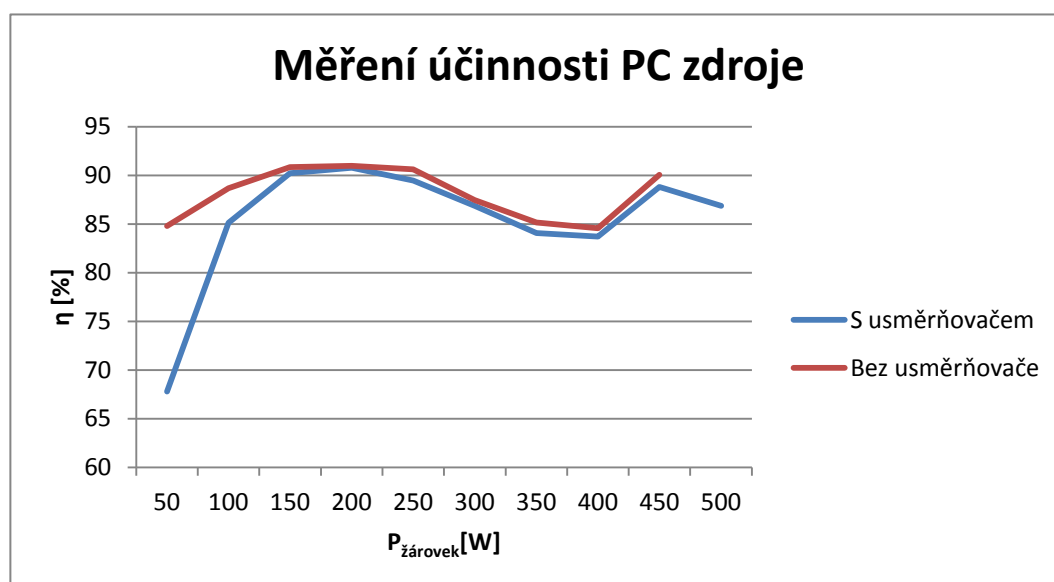


Měření účinnosti mělo hodně napovědět o kvalitách prodávaných počítačových zdrojů. Výsledek byl opravdu překvapením. Poslední hodnota za usměrňovačem nebyla změřena, zdroj se vždy na tak vysokém výkonu odpojil.

Pomocí uvedených výpočtů a měřících přístrojů byla změřena účinnost zdroje SeaSonic.

U <sub>vst</sub> [V]	I [A]	U <sub>výst</sub> [V]	I <sub>výst</sub> [A]	$\eta_{sUsm}$ [%]	U <sub>výst</sub>	I <sub>výst</sub>	$\eta_{bUsm}$ [%]
229,95	0,302	11,39	4,13	67,78199	11,43	4,51	84,78503
229,95	0,486	11,21	8,45	85,10737	11,33	8,21	88,67426
229,95	0,67	11,11	12,53	90,21925	11,38	11,77	89,59371
229,95	0,861	10,95	16,39	90,77921	11,28	15,6	90,98656
229,95	1,052	10,7	20,21	89,46918	11,31	19,1	90,61284
229,95	1,289	10,68	24,07	86,87651	11,36	22,57	87,4472
229,95	1,528	10,7	27,9	84,06928	11,55	26,07	85,22743
229,95	1,786	10,68	31,95	83,7159	11,35	29,87	83,54473
229,95	1,861	10,66	35,96	88,79629	11,4	34,1	90,06951
229,95	2,099	10,61	40,1	86,8465			

Tabulka 8: Účinnosti zdroje SeaSonic



Graf 4: Graf účinností zdroje SeaSonic

Z Tabulky č.8 a Grafu č 4 je patrné, že účinnost zdroje ovlivňuje usměrňovač velmi málo, a to kolem 1–2 % maxima.

Měření mělo zjistit, o kolik procent vyrobený měnič bez usměrňovače na účinnosti ušetří. Ukázalo se, že ztráta je minimální, a proto lze počítat jako další alternativu přestavěný počítačový zdroj, který velmi dobře obstál. Zdroje se dají zakoupit i s účinností na 95 %. Tento zdroj se dá považovat za velmi kvalitní a výrobce dodržel vysoký standart garantovaný na obalu. Tento kus v měření obstál.

## 5 Výroba DC/DC měniče

Příprava před výrobou se pohybovala na teoretické rovině. Jedno z prvních řešení funkčnosti bylo provedeno v programu Multisim 11. V programu se překreslilo celé schéma, pomocí zdrojů napětí a proudu byla přiváděna na různá místa určitá napětí a proud. Multimetry na různých místech kontrolovaly hladiny proudu a napětí.

### 5.1 Realizace zdroje

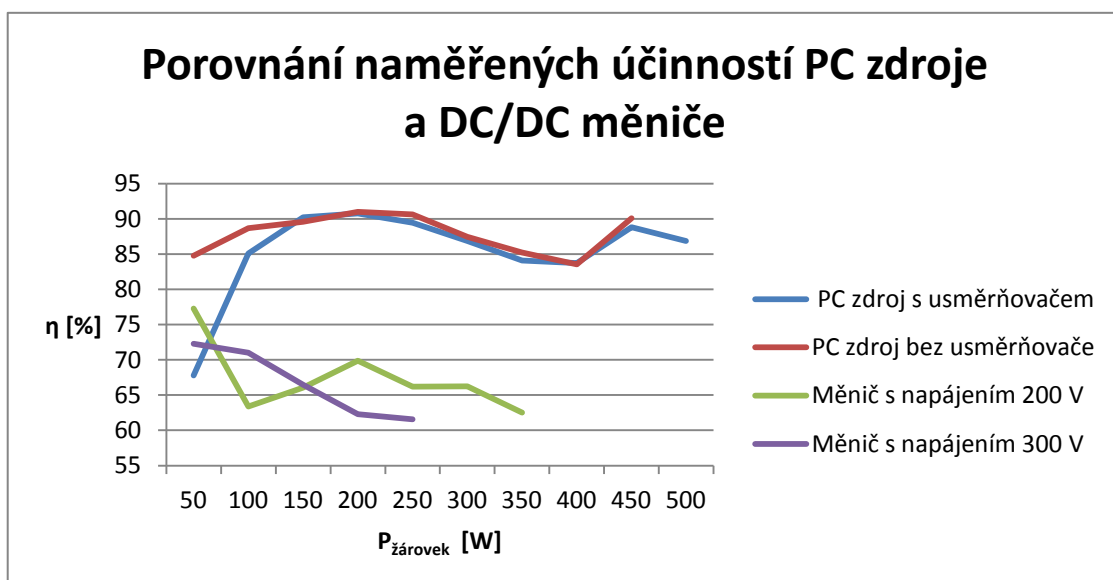
Vyrobená deska byla osazena a poté naměřena. K zjištění účinnosti byly použity voltmetry a ampérmetry na vstupu, z nichž byla dopočítána účinnost. První měření probíhalo na malém napájecím napětí 30 VDC, kde byla ověřena funkčnost součástek. Po správném buzení a spínání výkonových tranzistorů na osciloskopu mohlo začít hlavní měření.

Měření měniče bylo provedeno nejdříve při vstupním napětí 200 VDC a poté na 300 VDC. Jako odběr byly použity 50 W halogenové žárovky stejně jako pro PC zdroj. Bohužel při vyšších výkonech se tranzistory přehřívaly, takže nebylo možno změřit hodnoty až do 550 W.

pro 200 V							
$P_{\text{žárovka}}$ [W]	$U_{\text{vst}}$ [V]	$I_{\text{vst}}$ [A]	$P_{\text{vst}}$ [W]	$U_{\text{výst}}$ [V]	$I_{\text{výst}}$ [A]	$P_{\text{výst}}$ [W]	$\eta$ [%]
naprázdno	209	0		13,8	0		
50	197	0,42	82,74	13,9	4,6	63,94	77,27822
100	201	1	201	14	9,1	127,4	63,38308
150	200	1,4	280	13,6	13,6	184,96	66,05714
200	200	1,7	340	13,2	18	237,6	69,88235
250	204	2,12	432,48	12,9	22,2	286,38	66,21809
300	201	2,48	498,48	12,8	25,8	330,24	66,2494
350	203	2,79	566,37	12,6	28,1	354,06	62,5139

pro 300 V							
$P_{\text{žárovka}}$ [W]	$U_{\text{vst}}$ [V]	$I_{\text{vst}}$ [A]	$P_{\text{vst}}$ [W]	$U_{\text{výst}}$ [V]	$I_{\text{výst}}$ [A]	$P_{\text{výst}}$ [W]	$\eta$ [%]
naprázdno	300	0		13,6	0		
50	304	0,26	79,04	13,6	4,2	57,12	72,26721
100	302	0,55	166,1	13,4	8,8	117,92	70,99338
150	300	0,84	252	13,4	12,5	167,5	66,46825
200	300	1,22	366	13,1	17,4	227,94	62,27869
250	301	1,49	448,49	12,9	21,4	276,06	61,55321

Tabulka 9: Naměřené hodnoty vyrobeného DC/DC měniče



Graf 5: Porovnání účinnosti PC zdroje s vyrobeným DC/DC měničem

## 5.2 Návrh krabice

Vyrobený měnič je třeba umístit do vhodného krytu, aby nedošlo k poškození výrobku. Krabice byla navržena v programu Autodesk Inventor. Celkové rozměry jsou 200x140x70 mm. Vstup do krabice je navržený pomocí čtyř šroubů. Kvůli pohodlí a zamontování desky do krytu jsou sundavací obě strany najednou. Na zadní stranu krabice je navržen žebrový chladič ohýbaný z hliníkového profilu. Postranní část obsahuje vstupní a výstupní díry, do kterých budou vsazeny výstupní a vstupní vodiče.

Průchodka uprostřed, ze které je vyveden pin *shutdown*, je připravena pro vypnutí celého měniče. Toho se docílí při přivedení napětí na pin.

Tloušťka plechu je 2 mm. Šrouby mají průměr 8 mm s délkou 20 mm.



Obrázek 12: Návrh krabice pro DC/DC měnič

### 5.3 Výpočet chladiče

Chlazení navrženého měniče je navrženo na zadní stránce krabičky hliníkovým chladičem. Pro přesný výpočet chlazení potřebujeme získat tepelné odolnosti všech prvků z katalogů. Nejcitlivější na chlazení jsou spínací tranzistory, z jejichž parametrů bude vycházet celý výpočet chlazení. Jejich hodnoty určují nejméně příznivé parametry.

Ze zapojení a katalogu [13] pro výpočet jsou potřebné veličiny pro výpočet následující:

$U_{INMAX} = 320 \text{ V}$ ,  $I_{INMAX} = 7 \text{ A}$ ,  $t_{RISE} = 1,1 \text{ us}$ ,  $t_{FALL} = 0,7 \text{ us}$ ,  $f = 25 \text{ kHz}$ .

Nejdříve se vypočtou propustné ztráty:

$$P_P = \frac{U_{INMAX} * I_{INMAX}}{4 * T} * (t_{RISE} + t_{FALL}) = 25,2 \text{ W} \quad (30)$$

poté spínací ztráty:

$$P_s = U_{sat} * I_c * T_{on} * f = 4 \text{ W} \quad (31)$$

kde

$$T_{on} = \frac{\frac{U_{ef}}{2} * \frac{T}{2}}{U} = 14,14 \text{ us} \quad (32)$$

kde  $U_{sat} = 1,5 \text{ V}$  a  $I_c = 8 \text{ A}$  z katalogu.

Součet propustných ztrát a spínacích ztrát určí celkové ztráty na jeden tranzistor.

$$P = P_p + P_s = 29,2 \text{ W} \quad (33)$$

Z vypočítaných ztrát a z katalogových parametrů lze určit teplotu chladiče na jednotku wattu. Tak lze vybrat vhodný materiál. Výpočet vychází z následujících vztahů:

$$T_{\check{C}IP-POUZDRO} = R_{TEP-\check{C}IP-POUZDRO} * P = 32,12 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (34)$$

kde z katalogu  $R_{TEP-\check{C}IP-POUZDRO} = 1,1 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ , dále pak  $T_{MAX-\check{C}IP} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$   
a  $T_{MAX-TEP.OKOLÍ} = 45^{\circ}\text{C}$

$$T_{\check{C}IP-CHLADI\check{C}} = R_{TEP-\check{C}IP-POUZDRO} * P = 32,12 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} T_{CHLADI\check{C}-MAX} &= T_{MAX-\check{C}IP} - T_{\check{C}IP-POUZDRO} - T_{\check{C}IP-CHLADI\check{C}} \\ &= 150 - 64,24 = 85,76^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{MAX} &= \frac{T_{CHLADI\check{C}-MAX} - T_{MAX-TEP.OKOLÍ}}{P} = \frac{85,76 - 45}{29,2} \\ &= 1,39^{\circ}\text{C/W} \end{aligned} \quad (37)$$

## Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout měnič na koncepci spínaného zdroje, který dokáže z palubních článků trakční baterie snížit napětí z 200–320 VDC na 13,8 VDC, které je vhodné k nabíjení baterie v automobilu. V první fázi se bylo potřeba seznámit s palubní sítí elektromobilů a spínanými zdroji, z jejichž koncepce vychází navržený DC/DC měnič.

Práce začala teoretickým popisem továrně vyráběných elektromobilů i samotných školních eTUL a eŠus, u nichž byla věnována pozornost jejich palubní síti. V práci je popsána obecná problematika spínaných zdrojů. Jsou v ní uvedeny různé typologie zapojení zdrojů a také konkrétnější vnitřní funkce zdrojů od počítače, které v sobě spínaný zdroj obsahují.

V teoretické části byl navržen a upraven spínaný zdroj o výstupních hodnotách napětí 13,8 V a proudu 40 A, který je pro nabíjení elektromobilu vhodný. V praktické části byl následně zrealizován. Ručně navržené a vyrobené transformátory jsou klíčovým prvkem celého obvodu. Návrh obvodu byl zhotoven v programu *Eagle*. Poté byla vyrobena deska plošných spojů a následně osazena součástkami.

V úplném závěru práce byl porovnán vyrobený měnič DC/DC s PC zdrojem od firmy SeaSonic. Výsledné parametry hovoří pro továrně vyrobený PC zdroj. Možná úprava transformátoru TR1 a spínacích tranzistorů spolu s vhodnějším softstartem zlepší parametry celého DC/DC měniče.

Tento navržený měnič, je prvním řešením nabíjení z trakční baterie. Jeho úpravou lze tuto problematiku celou vyřešit. Bohužel nedostatek času, který byl zapříčiněn výrobou a dodávkou některých komponent, zabránil vylepšení jeho vlastností, které v budoucnosti lze upravit.

## Použitá literatura

- [1] ČSN, Česká technická norma ČSN 33 2000-4-41: Ochrana před úrazem elektrickým proudem. In: *Elektrická zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2000, č. 416.
- [2] DVOŘÁK, František. Nenápadné hvězdy Autosalonu Brno: škodovka od Giugiaro a Elektrofavorit Shortcut. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/nenapadne-hvezdy-autosalonu-brno-skodovka-od-giugiaro-a-elektrofavorit-shortcut-gg5-/automoto.aspx?c=A090607\\_210402\\_automoto\\_fdv](http://auto.idnes.cz/nenapadne-hvezdy-autosalonu-brno-skodovka-od-giugiaro-a-elektrofavorit-shortcut-gg5-/automoto.aspx?c=A090607_210402_automoto_fdv)
- [3] EKOBONUS.CZ. Jaké jsou provozní náklady elektromobilu?. [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.ekobonus.cz/jake-jsou-provozni-naklady-elektromobilu->
- [4] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 243 s. ISBN 80-860-5691-0.
- [5] KREJČÍŘÍK, A. *Napájecí zdroje I.díl*. 1. vyd. Praha: BEN, 1997, 350 s. ISBN 80-860-5602-3.
- [6] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II. Integrované obvody ve spínacích zdrojích*. 1. vyd. Praha: BEN, 1996, 351 s. ISBN 80-860-5603-1.
- [7] MARKOVIČ, Jan. BMW ukázalo futuristický elektromobil. [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://life.ihned.cz/auto/c1-60336330-bmw-ukazalo-futuristicky-elektromobil-v-cesku-bude-uz-v-listopadu-za-900-tisic-korun>
- [8] PILVOUSEK, Lukáš. *ELEKTROMOBIL PRO DVĚ OSOBY*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.

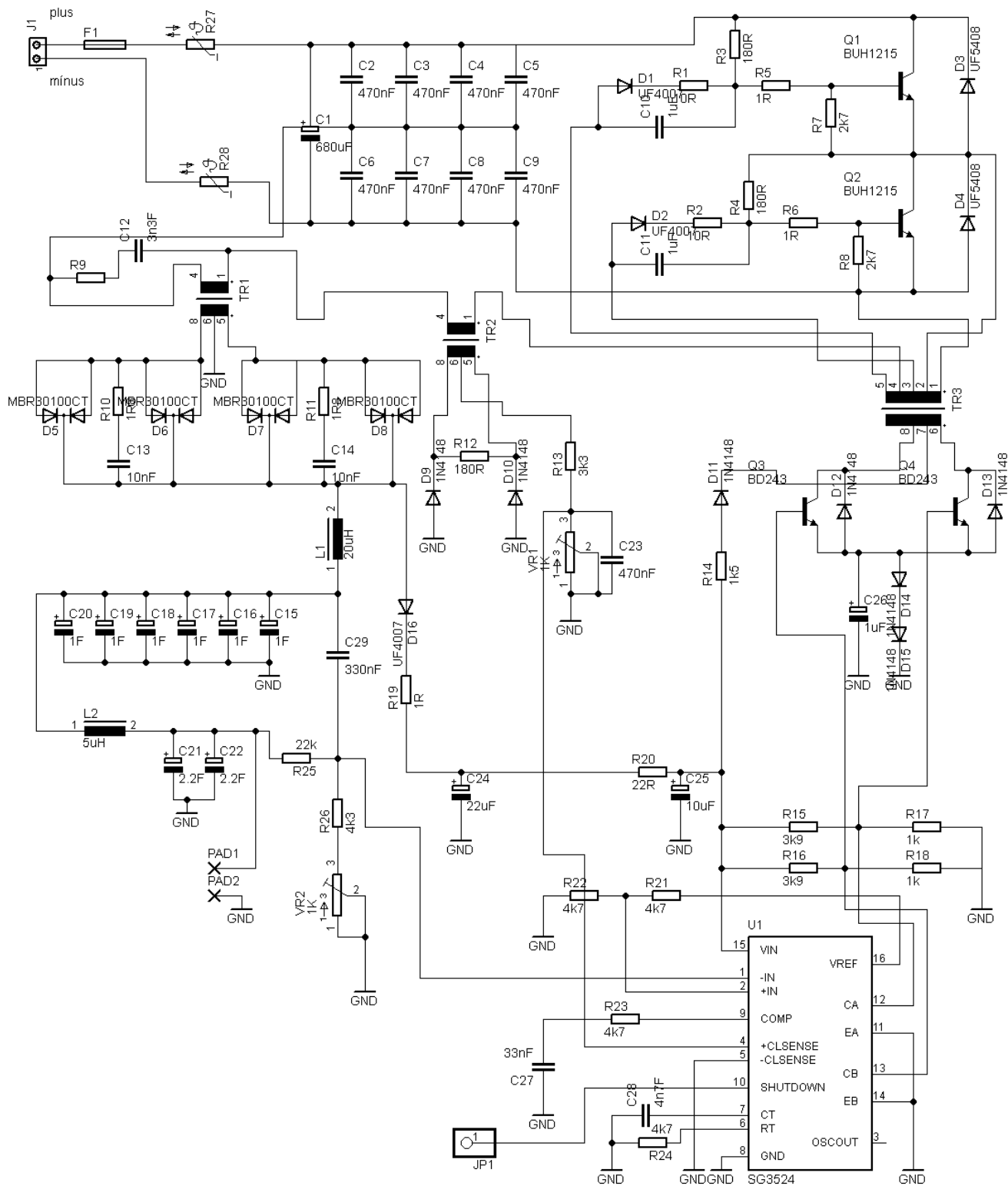


- [9] RADCOM. SOFT STARTING. [online]. 1998, s. 2 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://techdoc.kvindesland.no/radio/ymse1/20061117162040610.pdf>
- [10] SC MOSPEC. MBR30100CT: Schottky Barrier Rectifiers. [online]. s. 2 [cit. 2014-05-15].  
Dostupné z: <http://www.mospec.com.tw/pdf/schottky/MBR30100CT.pdf>
- [11] SCHMIDT-WALTER, Heinz Schmidt-Walter a Holger WENZEL. Design of Switch Mode Power Supplies. [online]. 2001. vyd. [cit. 2014-05-04].  
Dostupné z: [http://schmidt-walter.eit.h-da.de/smpps\\_e/hdw\\_smpps\\_e.html](http://schmidt-walter.eit.h-da.de/smpps_e/hdw_smpps_e.html)
- [12] STMICROELECTRONICS. BUH1215: HIGH VOLTAGE FAST-SWITCHING NPN POWER TRANSISTOR. [online]. s. 7 [cit. 2014-05-08].  
Dostupné z: <http://www.alphacron.de/download/hardware/BUH1215.pdf>
- [13] STMICROELECTRONICS. MJE13009: HIGH VOLTAGE FAST-SWITCHING NPN POWER TRANSISTOR. [online]. 2002, s. 7 [cit. 2014-05-16].  
Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/stmicroelectronics/5294.pdf>
- [14] TEXAS INSTRUMENT. Regulating pulse-width modulators: Datasheet SG3524. [online]. [cit. 2014-05-08].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slvs077d/slvs077d.pdf>
- [15] TOMSA, Jan. *Elektrická zařízení elektromobilu eTUL a jejich napájení*. Liberec, 2013. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Pavel Jandura.

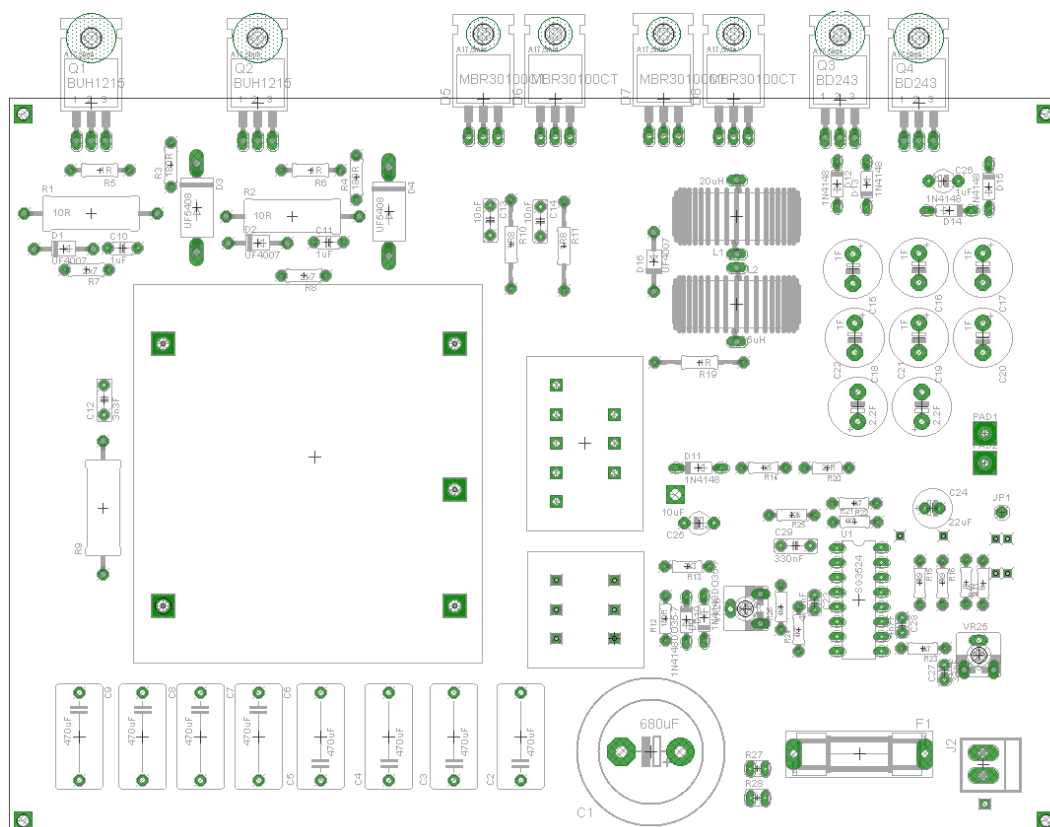
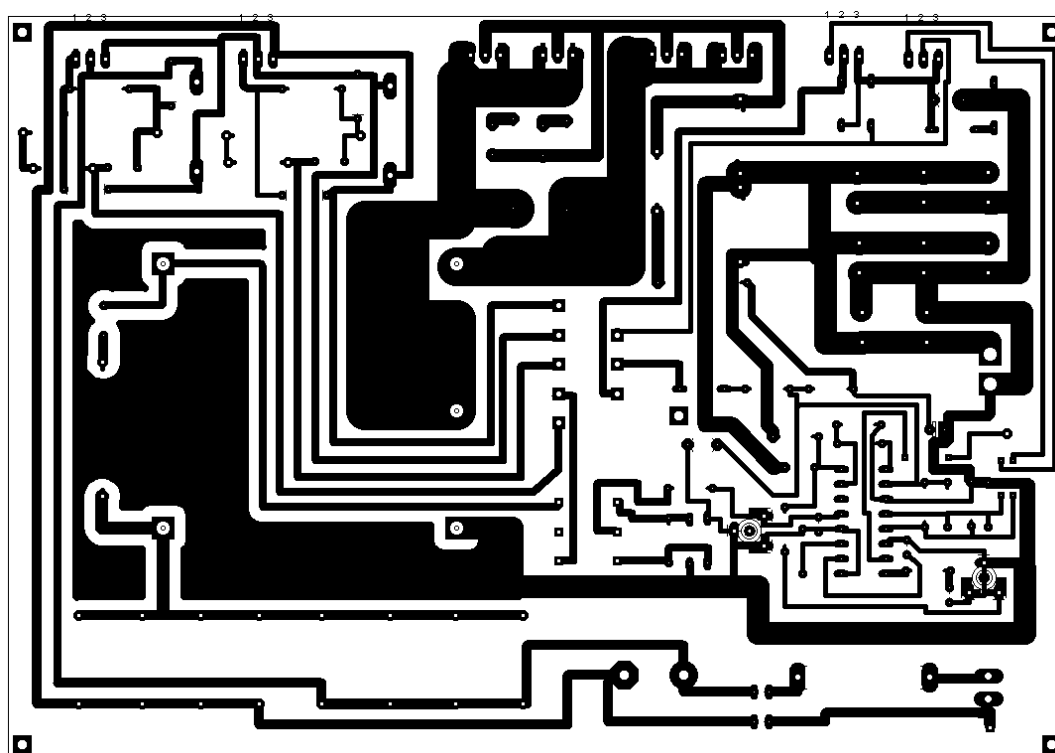
- [16] *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-04].  
Dostupné z: [http://www.elektromobily.org/wiki/Baterie\\_pro\\_elektromobily](http://www.elektromobily.org/wiki/Baterie_pro_elektromobily)
- [17] *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-20].  
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromobil>
- [18] ZAPATÍLEK, Karel. *Napájecí zdroje z chystané učebnice Elektronické obvody II*. Dostupné z: <http://user.unob.cz/zaplatilek/>. Skripta pro výuku. Univerzita obrany v Brně.

# A Navržený DC/DC měnič

## A.1 Schéma zapojení DC/DC měniče



## A.2 Pohled návrhu ze strany plošných spojů a osazení součástek



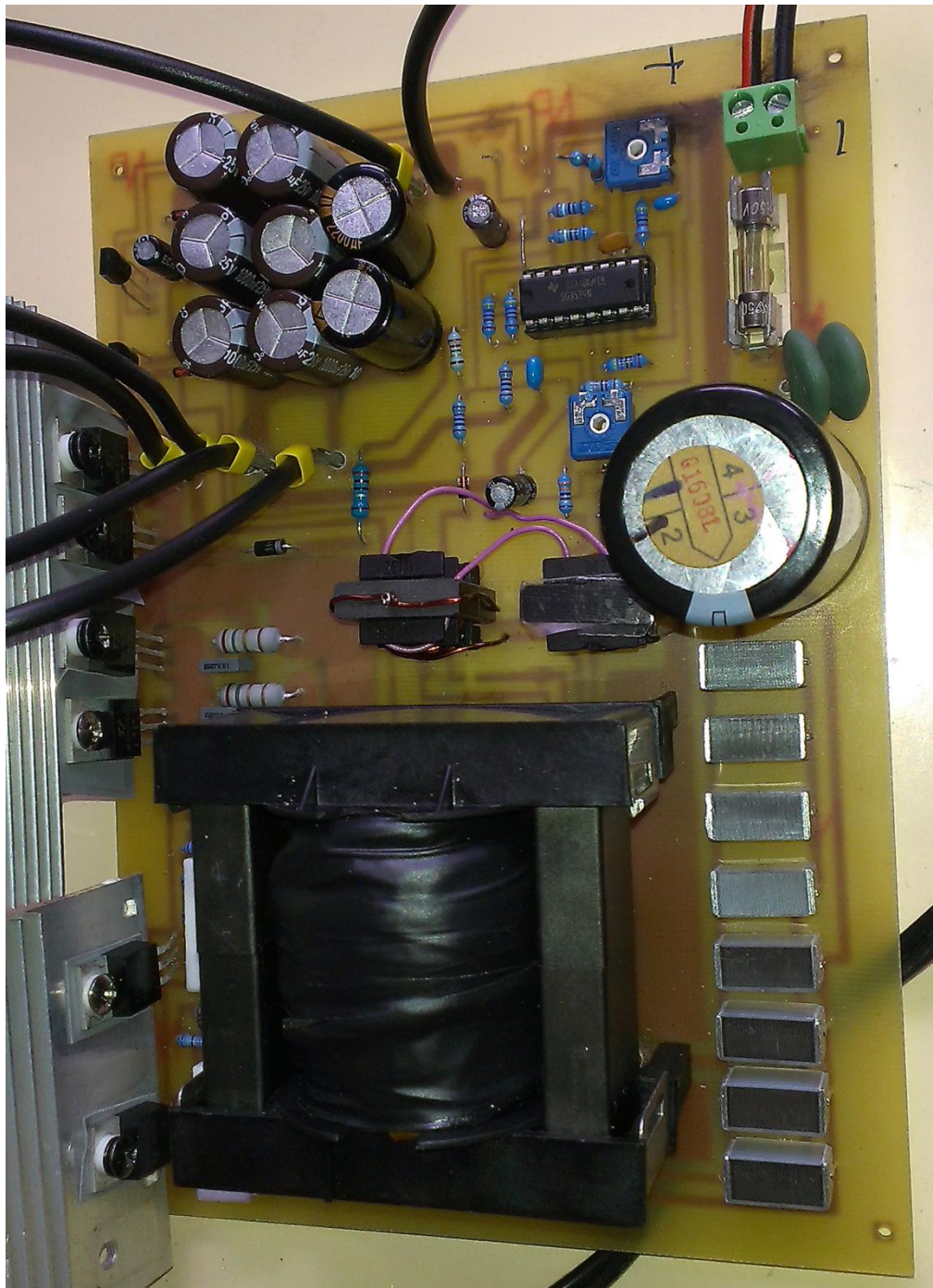
měřítko 1:2

## B Seznam součástek

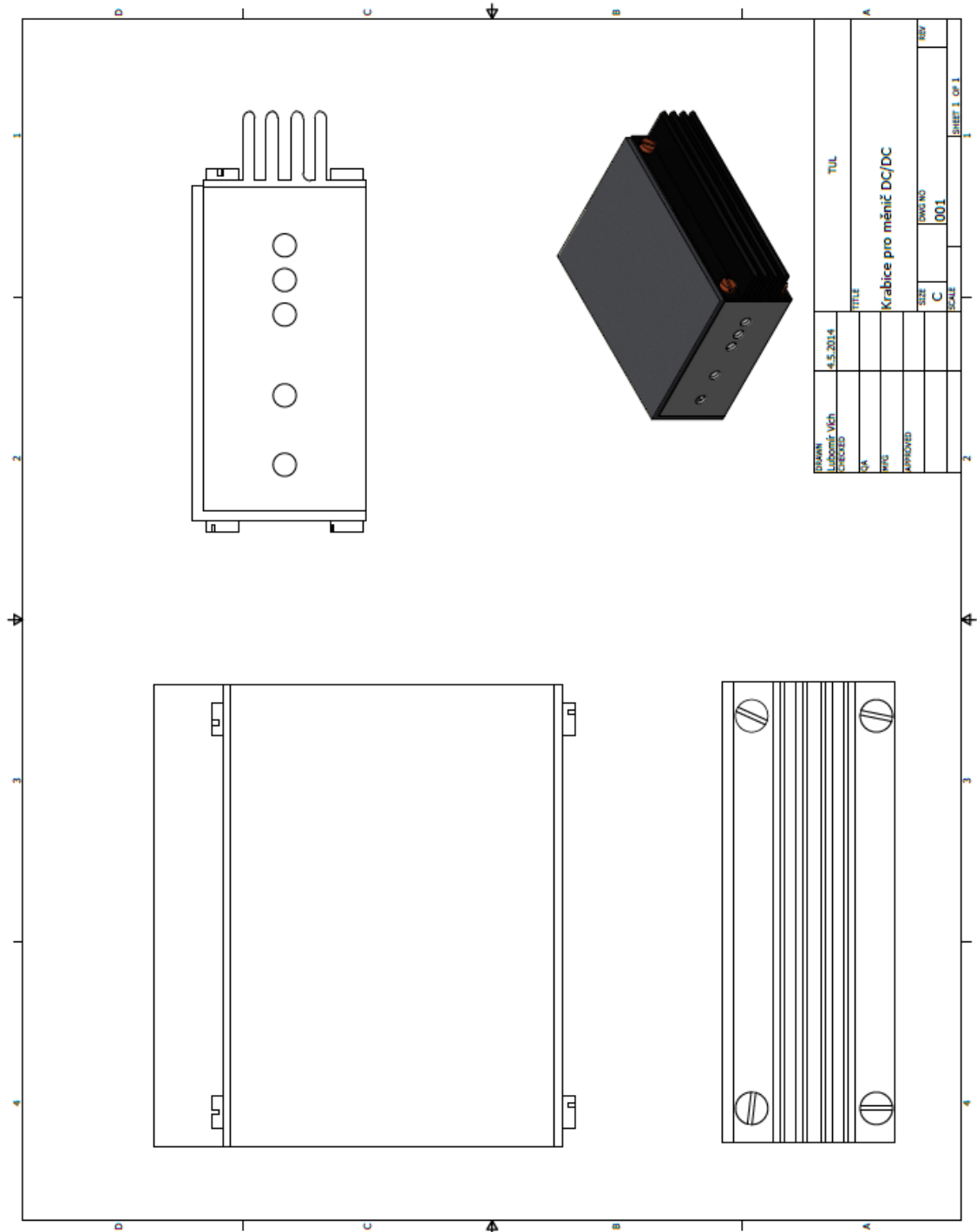
Schematická značka	hodnota	popis
C1	680 uF /450 V	Elektrolytický kondenzátor
C2-C9	470 uF /630 V	Fóliový kondenzátor
C10, C11	1 uF	Keramický kondenzátor
C12	3.3 nF	Fóliový kondenzátor
C13, C14	10 nF	Fóliový kondenzátor
C15 – C20	1 F /25 V, low ESR	Elektrolytický kondenzátor
C21, C22	2.2 F /16V, low ESR	Elektrolytický kondenzátor
C23	470 nF	Keramický kondenzátor
C24	22 uF	Elektrolytický kondenzátor
C25	10 uF	Elektrolytický kondenzátor
C26	1 uF	Elektrolytický kondenzátor
C27	33 nF	Keramický kondenzátor
C28	4.7 nF	Keramický kondenzátor
C29	330 nF	Keramický kondenzátor
D1,D2, D16	UF4007	Usměrňovací dioda
D3, D4	UF5408	Usměrňovací dioda
D5-D8	MBR30100CT	TO220AB Shotkyho dioda
D9-D15	1N4148	Usměrňovací dioda
R1, R2	10 $\Omega$ /5 W	Rezistor drátový
R3, R4, R12	180 $\Omega$ /0,5 W	Rezistor metalizovaný
R5, R6	1 $\Omega$ /1W	Rezistor metalizovaný
R7, R8	2.7 k $\Omega$ /0,5 W	Rezistor metalizovaný
R9	47 $\Omega$ /5 W	Rezistor drátový
R10, R11	1.8 $\Omega$ /2 W	Rezistor metaloxidový
R13	3.3 k $\Omega$ /0,5 W	Rezistor metalizovaný
R14	1.5 k $\Omega$ /0,5 W	Rezistor metalizovaný
R15, R16	3.9 k $\Omega$ /0,5 W	Rezistor metalizovaný
R17, R18	1 k $\Omega$ /0,5 W	Rezistor metalizovaný
R19	1 $\Omega$ / 0,5 W	Rezistor metalizovaný
R20	22 $\Omega$ / 0,5 W	Rezistor metalizovaný
R21 – R24	4.7 k $\Omega$ / 0,5 W	Rezistor metalizovaný
R25	22 k $\Omega$ /0,5 W	Rezistor metalizovaný
R26	4.3 k $\Omega$ /0,5 W	Rezistor metalizovaný
R27, R28	Termistor NTC	R(25 °C) = 10 Ohm, I <sub>max</sub> = 7,5 A
VR1, VR2	1 k $\Omega$ trimr	Rezistorový trimr ležatý
L1	20 uH	AMIDON 157-26

L2	5 uH	AMIDON
Q1, Q2	BUH1215, MJE13009	Výkonový transistor
Q3, Q4	BC639	Budící tranzistor
U1	SG3524	elektron. spínač pro pulzní mód
TR1	Lj ETD5922-CF139	Hlavní transformátor
TR2	Lj E 2005S-CF138	Proudový transformátor
TR3	Lj E 2005S-CF138	Budící transformátor
F1	pojistka	
J1	pin	
JP1	svorkovnice	

## C Vyrobený DC/DC měnič

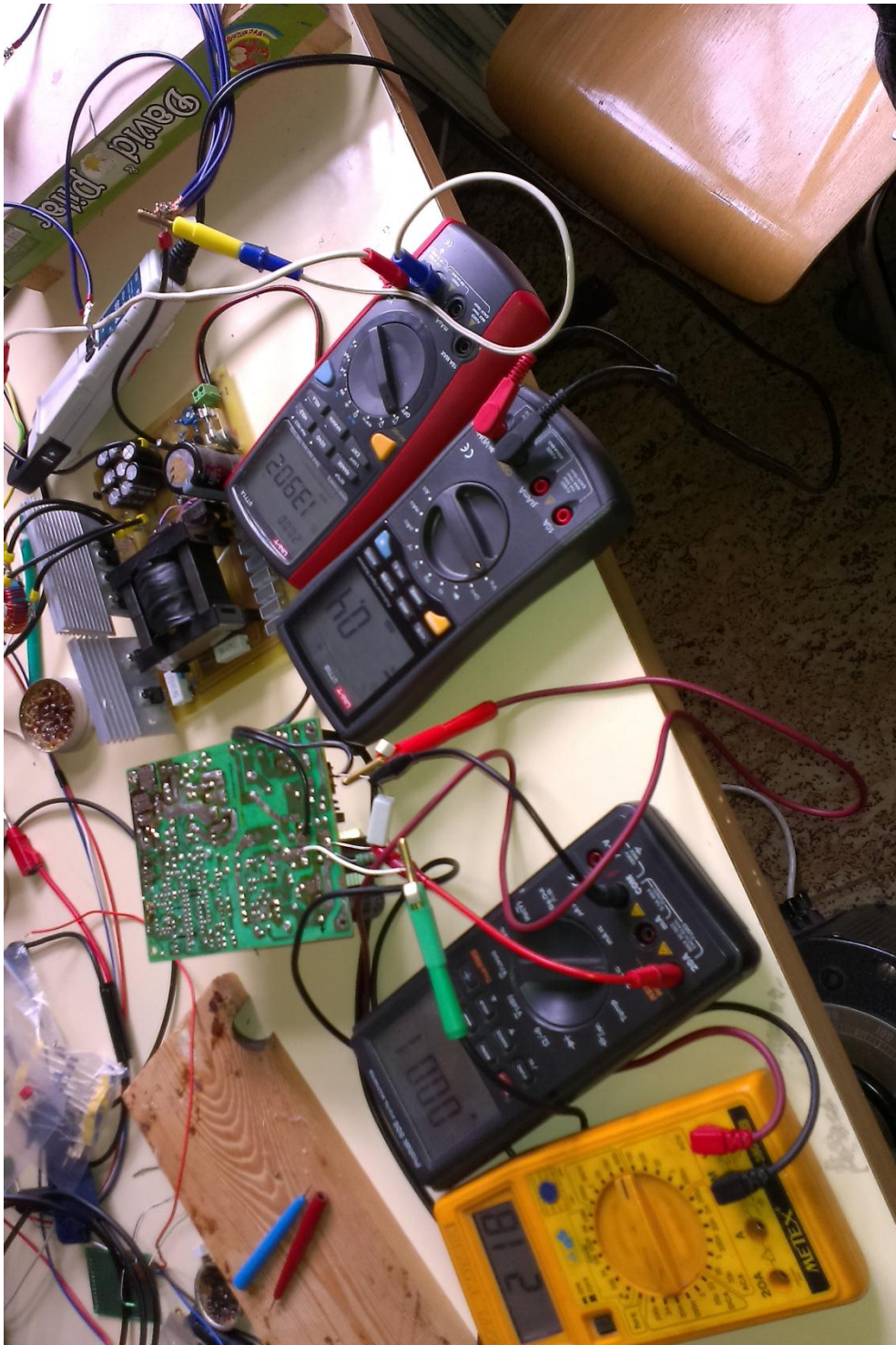


## D Technický náčrt navrhenej krabice





## E Měření účinnosti



F Tabulka spotřeb jednotlivých zařízení pro zvolená období

Celkem		Zimní období (tma) s nezávislým topením			Letní období (světlo) bez klimatizace			Zimní období (tma) s PTC topením			Letní období (světlo) s klimatizací		
Zařízení		Příkon [W]	Koeficient doby využívání	Příkon pro výpočty [W]	Příkon [W]	Koeficient doby využívání	Příkon pro výpočty [W]	Příkon [W]	Koeficient doby využívání	Příkon pro výpočty [W]	Příkon [W]	Koeficient doby využívání	Příkon pro výpočty [W]
Osvětlení	přední	50	1	50	10	1	0	50	1	50	10	1	0
		10	1	0	10	1	10	10	1	0	10	1	10
		50	1	50	50	1	50	50	1	50	50	1	50
		9	0,2	1,8	9	0,2	1,8	9	0,2	1,8	9	0,2	1,8
	zadní	2,4	0,2	0,48	2,4	0,2	0,48	2,4	0,2	0,48	2,4	0,2	0,48
		9	0,2	1,8	9	0,2	1,8	9	0,2	1,8	9	0,2	1,8
		6	0,2	1,2	6	0,2	1,2	6	0,2	1,2	6	0,2	1,2
		0,9	1	0,9	0,9	1	0	0,9	1	0,9	0,9	1	0,9
		0,9	0,2	0,18	0,9	0,2	0,18	0,9	0,2	0,18	0,9	0,2	0,18
		30	1	30	30	1	30	30	1	30	30	1	30
		0,3	1	0,3	0,3	1	0	0,3	1	0,3	0,3	1	0
	vnitřní	10	0,2	2	10	0,2	0	10	0,2	2	10	0,2	0
		0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	2000	1
Topení <sup>2)</sup>	Klimatizace <sup>1)</sup>	800	1	0	800	1	0	800	1	0	800	1	0
		3000	1	0	3000	1	0	3000	1	0	3000	1	0
	Posilovač řízení <sup>1)</sup>	Posilovač brzd <sup>1)</sup>	126	1	26	126	1	0	126	1	0	126	1
50			0,5	0	50	0,5	0	50	0,5	0	50	0,5	0
CELKEM	Sěrače	50	0,5	25	50	0,2	10	50	0,5	25	50	0,2	10
		40	0,2	8	40	0,2	8	40	0,2	8	40	0,2	8
	Ostřikovače	100	0,2	0	100	0,2	20	100	0,2	0	100	0,2	20
		20	0,2	4	20	0,2	4	20	0,2	4	20	0,2	4
	Elektrické ovládání oken	20	0,2	4	20	0,2	4	20	0,2	4	20	0,2	4
		20	0,2	4	20	0,2	4	20	0,2	4	20	0,2	4
	Zvukové výstražné zařízení	15	0,2	3	15	0,2	3	15	0,2	3	15	0,2	3
		30	1	30	30	1	30	30	1	30	30	1	30
	Parkovací senzory	50	0,1	5	50	0,1	5	50	0,1	5	50	0,1	5
		80	0,1	8	80	0,1	8	80	0,1	8	80	0,1	8
Audio	250	0,7	175	250	0,7	175	250	0,7	175	250	0,7	175	
	960 <sup>2)</sup>	427	359	960	0,7	359	960	0,7	359	960	0,7	359	
CELKEM		380 <sup>6)</sup>	188	188	380	0,7	188	380	0,7	188	380	0,7	188
Celkem pro výpočet NEDC		380	6)	188	380	0,7	188	380	0,7	188	380	0,7	188

1) V případě využití klimatizace, by se příkon mohl následně pohybovat odhadem okolo hodnoty 2 kW (nominální), resp. 4 kW (maximální). Počítáno je s nominální hodnotou, kterou klimatizace vykazuje při udržování nastavené teploty v kabině vozidla. Maximální hodnotě se vyhne pomocí dálkové programovatelné klimatizaci, pomocí které aktivujeme ochlazování ještě v době, kdy je vozidlo připojeno k nabíječce, takže nedojde k úbytku energie v trakční baterii.

2) Do tabulky zaneseny možné hodnoty příkonu pro navrhované varianty vytápění (podrobnosti viz 3.2.1 Vytápění interiéru). V celkovém součtu příkonu je však počítáno pouze s variantou využívající nezávislé topení.

3) Při použití např. PTC topení, by se příkon mohl následně pohybovat odhadem okolo hodnoty 3 kW (nominální), resp. 5 kW (maximální). Počítáno je s nominální hodnotou, kterou topení vykazuje při udržování nastavené teploty v kabině vozidla. Maximální hodnotě se vyhne pomocí dálkové programovatelné topení, pomocí kterého aktivujeme vyhřívání ještě v době, kdy je vozidlo připojeno k nabíječce, takže nedojde k úbytku energie v trakční baterii.

4) Odběr posilovače řízení nelze přesně určit. V technických parametrech jednotlivých posilovačů nejsou hodnoty udávány. Podle vyjádření výrobců posilovačů se odběry liší u každého vozidla. Obecně se předpokládá, že ve špičkách by mohl posilovač odebírat až 100 A a při jízdě po rovině nevykazuje žádný odběr. Jelikož je navrhnutý posilovač brzd Booster současně i rekuperacním zařízením (dodává energii do trakční baterie), byly spotřeby těchto dvou zařízení zanedbány. Specifické množství navracené energie pomocí Booster a naopak odběr posilovače řízení bude zjištěné až při budoucím reálném testování na elektromobilu.

5) Panel přístrojů, chlazení motoru a měniče, elektronika vozidla.

6) Pro výpočet spotřeby pomocí NEDC jsou ve vozidle zapnutý jen zařízení, které jsou nutná pro správný chod vozidla.